



TITLE:

衛星観測と計算機実験による地球  
磁気圏におけるイオン-波動-電子結  
合系の物理-磁気圏物理学の新展開-

AUTHOR(S):

松本, 紘

---

CITATION:

松本, 紘. 衛星観測と計算機実験による地球磁気圏におけるイオン-波動-電子結合系の物理-磁気圏物理学の新展開-. 2004

ISSUE DATE:

2004-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/81843>

RIGHT:

学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

---

衛星観測と計算機実験による地球磁気圏におけるイオン-波動-電子結合系の物理-磁気圏物理学の新展開-

---

(12304026)

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2)) 研究成果報告書



平成 16 年 3 月

研究代表者 松本 紘  
(京都大学 宙空電波科学研究センター)

---

衛星観測と計算機実験による地球磁気圏におけるイオン-波動-電子結合系の物理  
-磁気圏物理学の新展開-

---

(12304026)

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2)) 研究成果報告書

平成 16 年 3 月

研究代表者 松本 紘  
(京都大学 宙空電波科学研究センター)

## はじめに

本科学研究費補助金「衛星観測と計算機実験による地球磁気圏におけるイオン-波動-電子結合系の物理 -磁気圏物理学の新展開-」では、従来、個別に進んできた磁気圏物理学におけるマイクロ、および、マクロスケールの現象に関する研究をイオン-波動-電子結合系という立場で結びつけ、それらを実際の衛星観測で直に観測できる観測装置の開発を行い、そのマイクロからマクロへのエネルギー輸送メカニズムやマイクロ力学がマクロ構造に及ぼす影響を明らかにする手段を得ること、また、計算機実験、衛星データ解析による研究で具体的な現象に対するイオン-波動-電子の結びつきを明らかにすることを目的としている。もちろん、このテーマは非常に壮大であり、その解明には時間とかなりの研究の深化が必要である。本研究補助金では、衛星観測という立場、計算機実験という立場にたつて、この課題に取り組み、磁気圏物理学の新展開を計ろうとするものである。なお、本科学研究費補助金は、「最終年度前年度申請」として認められ、更に 3 年間の継続的研究に取り組むことが認められた。本研究報告書は、その意味で本研究課題に対する継続的取り組みの経過を踏まえた研究成果のとりまとめとする。

現在、国際的にみても磁気圏の衛星観測の流れは、編隊飛行による複数衛星観測である。これは従来の一点観測における時間・空間分離の不確定性を誰もが認識しているからである。しかし、編隊を組むには、重量などの厳しい条件がついてまわり、そこに技術開発の大きなブレイクスルーが必要である。本研究課題ではこのブレイクスルーを目指すべき軽量化され高度化されたプラズマ波動観測機の開発に取り組んでいる。一方で計算機実験では、計算機ハードウェア性能の格段の進歩に支えられ、そのモデル規模の大きさはここ数年で飛躍的に伸びている。いわゆる大規模計算機実験を遂行するに足るハードウェアの登場により、より精度の高い計算機実験、より現実に近いモデルの計算機実験ができるようになってきた。これこそ、本研究課題のイオンと電子の両方のスケールをカバーすることができる計算機実験を遂行する素地が整ってきたわけであり、本研究課題でもイオンビーム、電子ビーム不安定性をにおける kinetic coupling について研究を行い成果をあげることができた。

先にも書いたようにいずれも、まだ、継続中の研究課題であるが、ここで一度その成果をとりまとめて、今後の研究方針を見直すよいきっかけになればと考えている。

研究代表者

京都大学宙空電波科学研究センター・教授

松本 紘



### 研究組織

研究代表者: 松本 紘(京都大学 宙空電波科学研究センター・教授)  
研究分担者: 向井 利典(日本宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・教授)  
研究分担者: 橋本 弘藏(京都大学 宙空電波科学研究センター・教授)  
研究分担者: 大村 善治(京都大学 宙空電波科学研究センター・教授)  
研究分担者: 小嶋 浩嗣(京都大学 宙空電波科学研究センター・助教授)  
研究分担者: 臼井 英之(京都大学 宙空電波科学研究センター・助教授)  
研究分担者: 笠羽 康正(日本宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教授)

### 研究経費

	直接経費	間接経費
平成 12 年度	12,400 千円	0 千円
平成 13 年度	9,800 千円	2,940 千円
平成 14 年度	8,100 千円	2,430 千円
計	30,300 千円	5,370 千円

### 研究発表

#### ア 学会誌等

1. Matsumoto, H., I. Nagano and Y. Kasaba, Terrestrial Continuum Radiation in the Magnetotail: GEOTAIL Observations, *AGU Monograph*, 119, 187-203, 2000.
2. Kojima, H., Y. Omura, H. Matsumoto, K. Miyaguti, and T. Mukai, Automatic waveform selection method for electrostatic solitary waves, *Earth Planets Space*, 52, 495-502, 2000.
3. Kasaba, Y., T. Terasawa, T. Mukai, Y. Saito, H. Matsumoto, H. Kojima, K. Tsubouchi, J. Steinberg, D. McComas, R. Skoug, H. Matsui, M. Fujimoto, M. Hoshino, and A. Nishida, Magnetosheath electrons in anomalously low density solar wind observed by Geotail, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3253-3256, 2000.
4. Terasawa, T., Y. Kasaba, K. Tsubouchi, T. Mukai, Y. Saito, L. A. Frank, W. R. Paterson, K. Ackerson, H. Matsumoto, H. Kojima, H. Matsui, D. Larson, R. Lin, T. Phan, J. Steinberg, D. McComas, R. Skoug, M. Fujimoto, M. Hoshino, and A. Nishida, GEOTAIL observation of anomalously low density solar wind in the magnetosheath, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3781-3784, 2000.
5. Hellinger, P. and H. Matsumoto, New kinetic instability: Oblique alfven firehose, *J. Geophys. Res.*, 105, 10519-10526, 2000.
6. Miyake, T., Y. Omura, H. Matsumoto and H. Kojima, Electrostatic particle simulations of solitary waves in the auroral region, *J. Geophys. Res.*, 105, 23239-23249, 2000.
7. Tsubouchi, K., T. Terasawa, T. Mukai, Y. Saito, T. Yamamoto, S. Kokubun, H. Kojima, and H. Matsumoto, Motion of the Earth's bow shock in the deep-tail flank, *J. Geophys. Res.*, 105, 25097-25112, 2000.
8. Lakhina, G. S., B. T. Tsurutani, H. Kojima and H. Matsumoto, "Broadband" plasma waves in the boundary layers, *J. Geophys. Res.*, 105, 27791-27831, 2000.
9. Kasaba, Y., H. Matsumoto, Y. Omura, R. R. Anderson, T. Mukai, Y. Saito, T. Yamamoto, and S. Kokubun, Statistical studies of plasma waves and backstreaming electrons in the terrestrial electron foreshock observed by Geotail, *J. Geophys. Res.*, 105, 79-103, 2000.

10. Matsui, H., M. Nakamura, T. Terasawa, Y. Izaki, T. Mukai, K. Tsuruda, H. Hayakawa, and H. Matsumoto, Outflow of cold dense plasma associated with variation of convection in the outer magnetosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 521-526, 2000.
11. Hashimoto, K., H. Matsumoto, R. R. Anderson, J.-L. Bourgeret, and M. L. Kaiser, Low Frequency Bursts Observed by Multiple Satellites, *Proc. ISAP2000*, 2, 803-806, 2000.
12. Usui, H., H. Matsumoto, and F. Yamashita, Antenna analysis in magnetized plasma via particle-In-Cell simulations, *Proceedings of ISAP2000*, 3, 21-25, 2000.
13. Omura, Y., H. Kojima, T. Umeda, and H. Matsumoto, Observational evidence of dissipative small scale processes: Geotail spacecraft observation and simulation of electrostatic solitary waves, *Astrophys. Space Sci. Journal*, 277, 45-57, 2001.
14. Umeda, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, An improved masking method for absorbing boundaries in electromagnetic particle simulations, *Computer Physics Communications*, 137, 286-299, 2001.
15. Okada, T., S. Yagitani, I. Nagano, T. Imachi, M. Mukaino, Y. Kasaba, and H. Matsumoto, Propagation characteristics of ELF/VLF electromagnetic waves in the martian ionosphere and the possibility for detection of martian atmospherics by NOZOMI observations, *IEICE TRANS COMMUN.*, E84-B, 653-659, 2001.
16. Usui, H., H. Matsumoto, R. Gendrin, and T. Nishikawa, Computer experiments on a three-wave in association with microwave power transmission in space plasma, *IEICE transactions on communications, the special issue on innovation in antennas and propagation*, E84-B, 2566-2573, 2001.
17. Imhof, W. L., M. Walt, R. R. Anderson, J. D. Hawley, M. J. Brittner, S. M. Petrinec and H. Matsumoto, The relationship between X-ray, ultraviolet and kilometric radiation in the auroral region, *J. Geophys. Res.*, 106, 10479-10492, 2001.
18. Hellinger, P. and H. Matsumoto, Nonlinear competition between the whistler and alfvén fire hoses, *J. Geophys. Res.*, 106, 13215-13218, 2001.
19. Kasaba, Y., H. Matsumoto and Y. Omura, One- and two dimensional simulations of electron beam instability: Generation of electrostatic and electromagnetic 2fp waves, *J. Geophys. Res.*, 106, 18693-18711, 2001.
20. Matsui, H., K. Hayashi, T. Mukai, S. Ohtani, S. Kokubun, T. Yamamoto, H. Matsumoto, and K. Tsuruda, Broadband transverse waves below 1 Hz in the afternoon sector of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 106, 18873-18882, 2001.
21. Ishisaka, K., T. Okada, K. Tsuruda, H. Hayakawa, T. Mukai and H. Matsumoto, Relationship between the Geotail spacecraft potential and the magnetospheric electron number density including the distant tail regions, *J. Geophys. Res.*, 106, 6309-6320, 2001.
22. Kojima, H., M. Ashour-Abdalla, W. R. Paterson, H. Matsumoto, L. A. Frank, R. R. Anderson, R. L. Richard, S. Kokubun, and T. Yamamoto, Generation of the narrowband electrostatic noise in the geomagnetic tail: Geotail observation, *J. Geophys. Res.*, 106, 8483-8488, 2001.
23. Deng, X. H., and H. Matsumoto, First evidence of whistler driven reconnection in the magnetopause: GEOTAIL Observations, *Nature*, 410, 557-560, 2001.
24. Anderson, R. R., H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, I. Nagano, Y. Kasaba, M. L. Kaiser, J.-L. Bougeret, and J.-L. Steinberg, Using GEOTAIL, WIND, and POLAR observations of solar, interplanetary, and terrestrial plasma wave and radio emissions to identify source characteristics, *Planetary Radio Emissions V, Proc. Graz Conf.*, ed. By H. O. Rucker, M. L. Kaiser, and Y. Leblanc, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 297-310, 2001.
25. Kasahara, Y., H. Matsumoto, and H. Kojima, Type III solar radio bursts in the inhomogeneous interplanetary space observed by Geotail, *Radio Science*, 36, 1701-1711, 2001.

26. 上田 義勝, 小嶋 浩嗣, 岩井 宏徳, 藤原 亮介, 橋本 弘蔵, 松本 紘, 長野 勇, 岡田 敏美, 北極ロケット実験搭載用デジタル制御型プラズマ波動受信機の開発, *電子情報通信学会論文誌 J84-B*, 1808-1818, 2001.
27. 高野 博史, 長野 勇, 八木谷 聡, 福岡 将, 松本 紘, 地球磁気圏遠尾部における Lobe Trapped Continuum Radiation の伝搬特性, *電子情報通信学会論文誌 J84-B*, 2358-2366, 2001.
28. Krasovsky, V. L., H. Matsumoto, and Y. Omura, Approximate invariant of electron motion in the field of a whistler propagating along the geomagnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 20-1-20-4, 2002.
29. Matsumoto, H., Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan, *IEEE Microwave magazine*, 3, 36-45, 2002.
30. Nishimura, K., H. Matsumoto, and H. Kojima, Electron acceleration and heating influenced by whistler wave packets at quasi-parallel shock waves, *J. Geophys. Res.*, 107, 7-1-7-11, 2002.
31. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Formation of electrostatic solitary waves in space plasmas: Particle simulations with open boundary conditions, *J. Geophys. Res.*, 107, SMP 19-1-SMP 19-16, 2002.
32. Usui, H., H. Matsumoto, R. Gendrin, and T. Nishikawa, Numerical simulations of a three-wave coupling occurring in the ionospheric plasma, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9, 1-10, 2002.
33. Shklyar, D. R. and H. Matsumoto, Dynamics of a wave-pulse penetration into evanescent region, *Physical Review E*, 66-046612, 1-11, 2002.
34. Iwai, H., Y. Ueda, H. Kojima, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, and H. Matsumoto, Plasma wave analyzer for the SS-520-2 rocket experiment in the polar cusp region, *Proceedings of ISTS 2002*, 2092-2095, 2002.
35. Iwai, H., K. Hashimoto, H. Matsumoto, and H. Kojima, Development of a software wave receiver onboard spacecraft, Submitted to *IEICE Trans. Commun.*, 2002.
36. Hashimoto, K., K. Tsutsumi, and H. Matsumoto, Direction finding system for multiple microwave power receiving sites by spread spectral pilot signals, Submitted to *IEICE Trans. COMMUNICATIONS*, 2002.
37. Imhof, W. L., R. R. Anderson, M. Walt, J. D. Hawley, S. M. Petrinec, J. Mobilia and H. Matsumoto, The Dependence of AKR Production on the Intensity and Energy Spectra of Auroral Bremsstrahlung, Submitted to *J. Geophys. Res.*, 2002.
38. 井町 智彦, 八木谷 聡, 長野 勇, 筒井 稔, 松本 紘, GEOTAIL 衛星搭載電界観測アンテナの実効長の評価, *電子情報通信学会論文誌 J85-B*, 97-104, 2002.

#### イ 口頭発表

1. Imachi, T., I. Nagano, S. Yagitani, M. Tsutsui and H. Matsumoto, Characteristics of electric dipole antennas onboard GEOTAIL, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
2. Ishisaka, K., J. Hawkins, T. Okada, T. Nishio, I. Nagano and H. Matsumoto, Measurement of electron density profile in the lowest ionosphere, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
3. Nakamura, M., M. Fujimoto and H. Matsumoto, Instability at interface between reconnection jet and pre-existing plasma sheet, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
4. Matsumoto, H., X. Deng, H. Kojima and T. Mukai, Correlation between BEN (ESW and NEN) and high speed plasma flow associated with reconnection -GEOTAIL observations-, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
5. Hellinger, P. and H. Matsumoto, Oscillation and reformation of perpendicular shocks, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
6. Omura, Y., T. Yamamoto, H. Usui, M. Nakamura, H. Matsumoto and M. Hesse, Electron

acceleration and microscopic instabilities induced by magnetic reconnection, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.

7. Anderson, R. R., B. D. Huedepohl, H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, I. H. Cairns, Y. Kasaba and I. Nagano, Observations of enhanced electron plasma oscillations in the magnetosphere, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
8. Kasaba, Y., H. Matsumoto, K. Hashimoto and M. L. Kaiser, Distribution of foreshock 2fp radio source: Statistics by wind spacecraft, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2000.
9. Usui, H., H. Matsumoto, Y. Omura, H. Kojima, and H. Furuta, Modulated Langmuir waves in the GEOTAIL observations and computer experiments, European Geophysical Society, Nice, 2000.
10. Matsumoto, H., K. Nakao, and H. Kojima, Computer simulation on wave and electron dynamics related to the Bow Shock, European Geophysical Society, Nice, 2000.
11. Okada, T., T. Imachi, I. Nagano, M. Mukaino, S. Yagitani and H. Matsumoto, ELF whistler transmission window in martian daytime ionosphere, International Symposium on Antennas and Propagation, Fukuoka, 2000.
12. Hashimoto, K., H. Matsumoto, R. R. Anderson, J-H Bougeret and M. L. Kaiser, Low frequency bursts observed by multiple satellites, International symposium on antennas and propagation, Fukuoka, 2000.
13. Usui, H., H. Matsumoto and F. Yamashita, Antenna analysis in magnetized plasma via particle-in-cell simulations, International symposium on antennas and propagation, Fukuoka, 2000.
14. Takano, H, I. Nagano, S. Yagitani and H. Matsumoto, Continuum radiation observed by GEOTAIL in the distant magnetotail, International symposium on antennas and propagation, Fukuoka, 2000.
15. Imachi, T., I. Nagano, S. Yagitani, M. Tsutsui and H. Matsumoto, Effective lengths of the dipole antennas aboard GEOTAIL spacecraft, International Symposium on Antennas and Propagation, Fukuoka, 2000.
16. Usui, H., H. Matsumoto and Y. Omura, Numerical simulations of electromagnetic interaction between antenna and space plasma, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
17. Murata, T., Y. Omura and H. Matsumoto, Multi-scale computer simulations for the study of magnetotail reconnections, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
18. Yahara, H., T. Murata and H. Matsumoto, Design, modeling and construction of solar-terrestrial data analysis and reference system (STARS), The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
19. Kojima, H. and H. Matsumoto, Plasma waves near earth's bow shock and their implication, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
20. Yagitani, S., I. Nagano, H. Matsumoto, Y. Omura and T. Mukai, GEOTAIL observation of chorus emissions in the magnetosphere, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
21. Nakamura, M. S., M. Fujimoto and H. Matsumoto, Three-dimensional reconnection in the magnetotail, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
22. Kasaba, Y., T. Terasawa, K. Tsubouchi, T. Mukai, Y. Saito, H. Matsumoto, H. Kojima, J. Steinberg, D. McComas, R. Skoug, H. Matsui, M. Hoshino and A. Nishida, Magnetosheath electrons in anomalously low density solar wind observed by GEOTAIL, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
23. Usui, H., H. Matsumoto and Y. Omura, Space environment simulator for the research of the spacecraft-plasma interactions, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
24. Murata, T., K. Tsutsumi, W. Kurth, K. Hashimoto and H. Matsumoto, Realtime monitor for auroral kilometric radiation: relationship with substorms, propagations in the vicinity of the earth, and realtime monitor system, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
25. Shin, K., K. Hashimoto, Y. Omura, H. Kojima, T. Okada, H. Matsumoto, R. R. Anderson,

- K. Tsuruda and T. Mukai, Study on electrostatic waves near the lower-hybrid frequency in the lobe region of earth's magnetotail observed by GEOTAIL, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
26. Hashimoto, K., H. Matsumoto, R. R. Anderson, J.-L. Bougeret, M. L. Kaiser, AKR related emissions, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  27. Deng, X. H., H. Matsumoto and H. Kojima, Inherent relationship between reconnection and enhancement of wave activity: GEOTAIL observations, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  28. Anderson, R. R., H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, Y. Kasaba, M. L. Kaiser, J.-L. Bougeret, J.-L. Steinberg, I. Nagano, S. Yagitani, H. Takano and T. Murata, GEOTAIL, POLAR and wave istp in situ and remote observations of auroral plasma and radio wave emissions related to storms and substorms, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  29. Ueda, Y., H. Kojima, H. Matsumoto, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada and T. Mukai, Plasma waves in the relation to heating heavy ions in the POLAR cusp region: rocket experiment, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  30. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto and H. Usui, Formation of electrostatic solitary waves in kinetic simulation models with open boundaries, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  31. Nakamura, M. S., M. Fujimoto, M. Scholer and H. Matsumoto, The structure of dayside magnetic reconnection layer, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  32. Miyake, T., Y. Omura and H. Matsumoto, Particle simulations of electrostatic solitary waves in the auroral region, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  33. Takano, H., I. Nagano, S. Yagitani, M. Fukuoka, K. Hashimoto, H. Matsumoto and R. R. Anderson, Low frequency continuum radiation observed by GEOTAIL in the magnetotail, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  34. Matsumoto, H. and H. Kojima, Computer simulation of wave and electron dynamics elated to the bow shock, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  35. Omura, Y., T. Umeda, H. Usui and H. Matsumoto, Electron beam instabilities in a nonuniform system: generation of langmuir waves and solitary waves, The First S-RAMP Conference, Sapporo, 2000.
  36. 新 浩一, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 橋本 弘藏, GEORAIL 衛星によるマグネトシース領域におけるプラズマ波動の統計解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  37. 福岡 将, 高野 博史, 長野 勇, 八木谷 聡, 松本 紘, 地球磁気圏尾部における Continuume Radiation の特性解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  38. 井町 智彦, 長野 勇, 八木谷 聡, 筒井 稔, 松本 紘, GEOTAIL 衛星搭載電界観測アンテナの実効長に関する計算と実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  39. 笠羽 康正, 松本 紘, 橋本 弘藏, Kaiser M. L., フォアショック 2fp 電波源: WIND 衛星データによる統計解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  40. 西村 香純, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 準平行衝撃波におけるプラズマ加熱に関する粒子シミュレーション研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  41. 梅田 隆行, 大村 善治, 臼井 英之, 松本 紘, 開放系二次元電磁粒子コードによる静電孤立波の計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  42. 臼井 英之, 松本 紘, 大村 善治, 宇宙プラズマ中のアンテナ近傍電磁環境に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
  43. 奥田 恭広, 高野 博史, 長野 勇, 八木谷 聡, 橋本 弘藏, 松本 紘, 磁気圏尾部における Z モード波の解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.

44. 大村 善治, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 水星ミッションプラズマ波動班, 水星磁気圏におけるプラズマ波動の線形分散解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
45. 村田 健史, 岡田 雅樹, 上田 裕子, 大村 善治, 松本 紘, マルチスケール計算による磁気圏尾部リコネクションの計算機実験 2, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
46. 松本 紘, Xiaohua Deng, 小嶋 浩嗣, 向井 利典, 新 浩一, 昼間側磁気リコネクションに伴うプラズマ波動現象-BENとNEN-, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
47. 松本 紘, 中尾 健司, 小嶋 浩嗣, Bow shock 周辺におけるマイクロ現象に関する計算機シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
48. 石坂 圭吾, 岡田 敏美, 鶴田 浩一郎, 早川 基, 向井 利典, 松本 紘, 磁気圏境界領域における低エネルギープラズマ分布調査, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
49. 富嶋 大輔, 三宅 壮聡, 渡辺 義史, 岡田 敏美, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 低緯度昼間側カスプ領域における酸素イオン加速・加熱機構の研究:SS-520-2 観測ロケット搭載低周波電界観測器(EFD)による観測計画, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
50. 小嶋 浩嗣, 渡辺 航也, 松本 紘, 向井 利典, 狭帯域静電波, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
51. 梅田 隆行, 大村 善治, 臼井 英之, 松本 紘, 開放形における静電孤立波の二次元電磁粒子シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
52. 堤 康一郎, 村田 健史, 松本 紘, GEOTAIL/PWI による地球磁気圏の Continuum Radiation の低周波数側遮断周波数の自動検出, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
53. 安木 慎, 臼井 英之, 松本 紘, 大村 善治, プラズマ中和器を用いた宇宙機の帯電緩和に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 板橋区立文化会館, 2000.
54. 臼井 英之, 宮田 克也, 松本 紘, 宇宙プラズマ中の物体近傍シース領域における電磁環境, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
55. 新 浩一, 橋本 弘藏, 岡田 敏美, 松本 紘, 鶴田 浩一郎, 向井 利典, GEOTAIL 衛星による磁気圏尾部ローブ領域低域混成周波数帯静電波動の研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
56. 大村 善治, 山本 輝哉, 臼井 英之, 松本 紘, 磁力線再結合領域における電子加速機構の計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
57. 村田 健史, 大村 善治, 松本 紘, マルチスケール計算による磁気圏尾部リコネクションの計算機実験:ハイブリッドコード・KEMPO コード, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
58. 三宅 壮聡, 大村 善治, 松本 紘, Particle Simulations of Solitary Waves in the Auroral Region: Coupling Process of Potentials and Ions, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2000.
59. 岩井 宏徳, 壁内 幹人, 橋本 弘藏, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, ソフトウェア処理による飛翔体搭載用波動受信機の開発, 電子情報通信学会, 広島大学, 2000.

60. Boardsen, S., J. Green, S. Fung, B. Reinisch, B. Sandel, R. Anderson, H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, M. Kaiser, and T. Forrester, The association of kilometric continuum with from plasmaspheric bite-outs: A multi-event study using IMAGE, Geotail, and Wind, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2001.
61. Hashimoto, K., H. Matsumoto, R. R. Anderson, and W. Calvert, Characteristics of kilometric continuum, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2001.
62. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Electromagnetic particle simulations of electron beam instabilities in a two-dimensional open system, AP-RASC, Chuo University, Tokyo, 2001.
63. Murata, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, A study of wave-particle interactions near the neutral sheet during compression of plasma sheet in the magnetotail: Hybrid comde and KEMPO code computer simulations, AP-RASC, Chuo University, 2001.
64. Ishisaka, K., T. Okada, T. Nishio, J. G. Hawkins, I. Nagano, and H. Matsumoto, Measurement of electron density profile in the lowest ionosphere using the SRP-4 rocket payload, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
65. Matsumoto, H., GEOTAIL contribution to space plasma physics via plasma wave observations, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
66. Usui, H., H. Matsumoto, and Y. Omura, Computer experiments on electromagnetic interaction between antenna and space plasma, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
67. Imachi, T., I. Nagano, S. Yagitani, M. Tsutsui, and H. Matsumoto, Effective lengths of dipole antennas aboard Geotail spacecraft, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
68. Takano, H., I. Nagano, S. Yagitani, M. Fukuoka, and H. Matsumoto, Propagation characteristics of lobe trapped continuum radiation in the distant magnetotail, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
69. Hashimoto, K., R. R. Anderson, H. Matsumoto, W. Calvert, H. Oya, and M. Iizima, Source of Kilometric continuum, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
70. Ueda, Y., H. Kojima, H. Matsumoto, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, T. Mukai, H. Iwai, and R. Fujiwara, Plasma wave observation in the polar region via SS-520-2 rocket experiment, AP-RASC 2001, Chuo University, 2001.
71. Shin, K., H. Matsumoto, and H. Kojima, Statistical analyses of plasma waves in the bow shock and magnetosheath regions: Geotail observations, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
72. Omura, Y., K. Ninomiya, T. Umeda, H. Usui, and H. Matsumoto, Coherent potential structures induced by electron/ion beam instabilities in plasmas, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
73. Nishimura, K., H. Matsumoto, and H. Kojima, Electron heating influenced by whistler wave packets at quasi-parallel shock waves, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
74. Yagitani, S., I. Nagano, H. Matsumoto, Y. Omura, and T. Mukai, GEOTAIL observation of cyclotron growth of chorus emissions, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
75. Kasaba, Y., and H. Matsumoto, Observations and computer simulations of 2fp emissions, AP-RASC2001, Chuo University, Tokyo, 2001.
76. Matsumoto, H., K. Nishimura, and H. Kojima, Computer simulations on dynamics of plasma particles at quasi-parallel shock waves, EGS XXVI General Assembly, Nice, France, 2001.
77. Kojima, H., S. Yagitani, Y. Omura, and H. Matsumoto, Plasma wave observations of the Mercury mission, EGS XXVI General Assembly, Nice, France, 2001.
78. Nakamura, M. S., M. Fujimoto, and H. Matsumoto, Structures of dayside magnetopause boundary layer caused by magnetic reconnection, EGS XXVI General Assembly, Nice, France, 2001.



79. Matsumoto, H., Study on microscopic processes in the terrestrial bow shock, IAGA, Hanoi, Vietnam, 2001.
80. Nakamura, M. S., M. Fujimoto, and H. Matsumoto, Kinetic structure of reconnection jets in the geomagnetotail, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
81. Shin, K., H. Matsumoto, H. Kojima, and T. Mukai, Electrostatic plasma waves in the downstream region of the earth's bow shock: Geotail observation, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
82. Usui, H., H. Matsumoto, T. Ogino, M. Fujimoto, Y. Omura, M. Okada, H. O. Ueda, T. Murata, Y. Kamide, H. Shinagawa, S. Watanabe, S. Machida, and T. Hada, Development of space simulation/net-laboratory system, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
83. Ueda, Y., H. Kojima, H. Matsumoto, K. Hashimoto, I. Nagano, and T. Okada, Plasma wave observation in the polar cusp region: SS-520-2 rocket experiment, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
84. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Particle simulations of electromagnetic emissions from electrostatic solitary waves, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
85. Iwata, M., H. Matsumoto and H. Kojima, Computer experiments on the plasma wave generation in the vicinity of Earth's bow shock, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
86. Omura, Y., T. Umeda, and H. Matsumoto, Electron beam instabilities and nonlinear potential structures in space plasmas, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
87. Matsumoto, H., The future of simulations for space applications, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
88. Yamamoto, A., H. Usui, Y. Omura, and H. Matsumoto, Computer experiments on antenna characteristics in space plasmas, The Sixth International School/Symposium for Space Plasmas Simulations, Garching, Germany, 2001.
89. 臼井 英之, 松本 紘, 荻野 竜樹, 藤本 正樹, 粒子モデル班, MHD モデル班, ハイブリッドモデル班, 宇宙シミュレーション・ネットラボラトリーシステムの開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
90. 梅田 隆行, 大村 善治, 松本 紘, 臼井 英之, 静電孤立波からの電磁波放射に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
91. 村田 健史, 大村 善治, 松本 紘, マルチスケール計算機実験による異常抵抗発生の計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
92. X. H. Deng, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 向井 利典, Evidence of whistler-mediated reconnection in the near-Earth space and the characteristics of the associated wave activities, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
93. 山本 敦士, 臼井 英之, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 大村 善治, 宇宙プラズマ中でのアンテナ特性に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
94. 松本 紘, 岩田 元希, 西村 香純, 小嶋 浩嗣, バウショックプラズマ波動, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
95. 上田 義勝, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 橋本 弘藏, 長野 勇, 岡田 俊美, 向井 利典, 岩井 宏徳, 藤原 亮介, SS-520-2 号機ロケット実験におけるプラズマ波動観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
96. 新 浩一, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 向井 利典, GEOTAIL 衛星によるバウショック下流における静電波動, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.



97. 岩田 元希, 松本 紘, 地球磁気圏バウショック近傍における波動励起機構に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
98. 井町 智彦, 八木谷 聡, 長野 勇, 東 亮一, 筒井 稔, 松本 紘, レオメトリ実験による GEOTAIL 衛星搭載電界観測アンテナの特性解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
99. 橋本 弘藏, 松本 紘, Roger R. Anderson, Wynne Calvert, Kilometric continuum の特性, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
100. 藤原 亮介, 小嶋 浩嗣, 上田 義勝, 松本 紘, 波形観測をベースとした宇宙プラズマ波動観測手法の研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
101. 中村 雅夫, 藤本 正樹, 松本 紘, Interchange instability at the reconnection jet front in the magnetotail, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
102. 富嶋 大輔, 三宅 壮聡, 岡田 敏美, 小嶋 浩嗣, 上田 義勝, 松本 紘, SS-520-2 ロケットによる ELF 帯プラズマ波動の観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
103. 奥田 恭広, 高野 博史, 長野 勇, 橋本 弘藏, 八木谷 聡, 松本 紘, 磁気圏尾部における Z モード波の解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
104. 梅田 隆行, 大村 善治, 臼井 英之, 松本 紘, 静電孤立波からの電磁波放射に関する二次元計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
105. 三宅 壮聡, 渡辺 義史, 岡田 敏美, 小嶋 浩嗣, 上田 義勝, 松本 紘, カスプ領域における DC 電場の SS-520-2 ロケット実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
106. 橋本 弘藏, 松本 紘, ロジャー アンダーソン, GEOTAIL 衛星と POLAR 衛星による banded AKR の観測とその生成機構, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
107. 大村 善治, 二宮 啓輔, 梅田 隆行, 臼井 英之, 松本 紘, プラズマ中の電子・イオンビーム不安定性によって生成されるポテンシャル構造, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
108. 西村 香純, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, Electron heating influenced Whistler wave packets at quasi-parallel shock waves, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
109. 山本 敦士, 臼井 英之, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 大村 善治, 宇宙プラズマ中でのアンテナ特性に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
110. 笠羽 康正, 松本 紘, 向井 利典, Studies of shock phenomena related to the electron foreshock, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
111. 新 浩一, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 向井 利典, GEOTAIL 衛星によるマグネトシース及びバウショック近傍におけるプラズマ波動の特性, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
112. 上田 義勝, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 橋本 弘藏, 岩井 宏徳, 藤原 亮介, 長野 勇, 岡田 敏美, 極域カスプ領域 SS-520-2 ロケット実験で観測されたプラズマ波動の初期解析報告, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
113. 石坂 圭吾, 岡田 敏美, 鶴田 浩一郎, 早川 基, 向井 利典, 松本 紘, Geotail 衛星電位から推定される電子密度への電子温度の影響, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.

114. 岩井 宏徳, 橋本 弘蔵, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 宇宙飛翔体搭載用ソフトウェア波動受信機の開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
115. 藤原 亮介, 小嶋 浩嗣, 上田 義勝, 岩井 宏徳, 橋本 弘蔵, 松本 紘, 長野 勇, 岡田 敏美, SS-520-2 号機ロケット実験搭載用プラズマ波動受信機とその性能評価, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
116. 小嶋浩嗣, 大村 善治, 松本 紘, 八木谷 聡, BepiColombo MMO による水星磁気圏プラズマ波動観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
117. 中村 雅夫, 藤本 正樹, 松本 紘, Three-dimensional instability of reconnection jet in the magnetotail, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
118. 笠原 禎也, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 非均質な惑星間空間におけるタイプ III 電波バースト--GEOTAIL 衛星による観測--, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
119. 岩田 元希, 松本 紘, 小嶋 浩嗣, 地球磁気圏バウショック上流領域における波動励起に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
120. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Two-dimensional particle simulation of electrostatic solitary waves with an open boundary condition, 11th International Congress on Plasma Physics, Sydney, Australia, 2002.
121. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Formation of electrostatic solitary waves: Two-dimensional particle simulation with open boundary conditions, 2002 Western Pacific Geophysics Meeting, Wellington, New Zealand, 2002.
122. Omura, Y., H. Kojima, and H. Matsumoto, Simulations, theory and Geotail observation of electrostatic solitary waves, 2002 Western Pacific Geophysics Meeting, Wellington, New Zealand, 2002.
123. Matsumoto, H., Trends and perspectives of space plasma physics and simulations in the coming era of space civilization, 34th COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY, HOUSTON, 2002.
124. Usui, H., H. Matsumoto, F. Yamashita, and Y. Omura, Antenna analysis in magnetized plasma via particle-in-cell simulation, 34th COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY, HOUSTON, 2002.
125. Kasaba, Y., H. Matsumoto, and Y. Omura, 2fp radiation in Geotail observations and numerical simulations, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
126. Matsumoto, H., GEOTAIL Plasma wave observations: What have we achieved ?, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
127. Yagitani, S., I. Nagano, H. Matsumoto, Y. Omura, and T. Mukai, Geotail observations of ELF/VLF waves in the magnetosphere, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
128. Hashimoto, K., H. Matsumoto, R. R. Anderson, and J. L. Green, Kilometric continuum and its radiation with geomagnetic activities, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
129. Morioka, A., Y. Miyoshi, T. Seki, F. Tsuchiya, H. Misawa, H. Oya, H. Matsumoto, K. Hashimoto, and T. Mukai, Storm time depression of AKR, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS,

Kanagawa, 2002.

130. Anderson, R. R., H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, I. Nagano, S. Yagitani, H. Takano, M. L. Kaiser, J.-L. Bougeret, Y. Kasaba, D. L. Carpenter, and J. L. Using plasma wave and radio emissions to measure geomagnetic activity, Green, plasmaspheric and magnetospheric plasma density and structure, and plasma dynamics, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
131. Takano, H., I. Nagano, S. Yagitani, and H. Matsumoto, Lobe trapped continuum radiation generated in the distant magnetotail, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
132. Sugiyama, T., M. Fujimoto, H. Matsumoto, and Y. Omura, Particle dynamics at collisionless shock waves, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
133. Shin, K., H. Kojima, H. Matsumoto, and T. Mukai, Electrostatic quasi-monochromatic wave in the downstream region of the bow shock: Geotail observation, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
134. Umeda, T., P. H. Yoon, Y. Omura, and H. Matsumoto, Vlasov simulation of harmonic Langmuir waves, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
135. Murata, T., K. Hashimoto, H. Matsumoto, W. Kurth, L. A. Frank, L. B. Sigwarth, and D. A. Gurnett, An electromagnetic simulator for 3D ray-tracing of the AKR, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
136. Imachi, T., S. Yagitani, I. Nagano, R. Higashi, M. Tsutsui, and H. Matsumoto, Effective length of wire antenna aboard Geotail, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
137. Ishisaka, K., T. Okada, H. Hayakawa, T. Mukai, and H. Matsumoto, Measurement of spacecraft potential by single probe system onboard Geotail spacecraft, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
138. Kojima, H., H. Matsumoto, Y. Omura, and T. Mukai, Microscopic phenomena in geospace: Geotail results and perspective to future missions, COSPAR Colloquim "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
139. Anderson, R. R., J. Douglas Menietti, D. L. Carpenter, H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, I. Nagano, S. Yagitani, H. Takano, W. Calvert, and M. B. Plasmaspheric and magnetospheric density and density structures determined from Moldwin, ISEE, CRRES, GEOTAIL, and POLAR plasma wave observations, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
140. Yagitani, S., I. Nagano, H. Takano, H. Matsumoto, Y. Omura, K. Hashimoto, H. Kojima, T. Mukai, W. R. Paterson, L. A. Frank, and R. R. Anderson, Geotail observations of electromagnetic waves in the magnetosphere, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
141. Matsumoto, H., M. Iwata, and H. Kojima, Full particle simulations of quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks and comparison with Geotail space observations, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
142. Umeda, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, Two-dimensional particle simulations of electromagnetic emissions from electrostatic solitary waves, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
143. Ishisaka, K., T. Okada, T. Miyake, H. Hayakawa, H. Matsumoto, and T. Mukai,

- Relationship between the plasma wave and the electron density estimated from the Geotail spacecraft potential, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
144. Imachi, T., S. Yagitani, I. Nagano, R. Higashi, M. Tsutsui, and H. Matsumoto, Rheometry experiment of the wire antenna aboard Geotail, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  145. Miyake, T., T. Okada, D. Tomishima, J. Miyakawa, K. Ishisaka, H. Kojima, Y. Ueda, and H. Matsumoto, Analysis of DC electric fields and ELF waves observed by SS-520-2 sounding rocket, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  146. Matsumoto, H., Y. Kasaba, T. Okada, K. Hashimoto, I. Nagano, S. Yagitani, T. Ono, H. Hayakawa, The Martian plasma wave experiment: Expectations for NOZOMI, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  147. Takano, H., I. Nagano, S. Yagitani, and H. Matsumoto, Lobe trapped continuum radiation generated in the distant magnetotail, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  148. Hashimoto, K., H. Matsumoto, and R. R. Anderson, Multi-satellite observations of banded AKR and its generation mechanism, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  149. Omura, Y., W. Heikkila, T. Umeda, K. Ninomiya, and H. Matsumoto, Particle simulation of plasma response to an applied electric field parallel to magnetic field lines, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  150. Anderson, R. R., H. Matsumoto, K. Hashimoto, H. Kojima, I. Nagano, S. Yagitani, H. Takano, Y. Kasaba, M. L. Kaiser, J.-L. Bougeret, J.-L. Steinberg, D. L. Using Geotail, Wind and Polar observations of plasma wave and radio emissions to Carpenter, further our understanding of dynamic heliospheric and magnetospheric phenomena, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  151. Deng, X. H., H. Matsumoto, and H. Kojima, First evidence of collisionless reconnection in the Earth's magnetosphere: Geotail observations, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  152. Shin, K., H. Matsumoto, H. Kojima, and T. Mukai, Electrostatic quasi-monochromatic wave in the downstream region of the bow shock: Geotail observation, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  153. Ueda, Y., H. Kojima, H. Matsumoto, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, and T. Mukai, Traveling ion cyclotron harmonic waves observed in the dayside polar region: SS-520-2 rocket experiment, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  154. Deng, X. H., H. Matsumoto, and H. Kojima, Observation of ESW associated with reconnection on dayside magnetopause boundary, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  155. Sugiyama, T., H. Matsumoto, and Y. Omura, Dissipation process at collisionless shocks in the electron scale, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
  156. 松本 紘, 岩田 元希, 小嶋 浩嗣, バウショックにおける静電波の発生のシミュレーション, SGEPS 波動分科会, 京都大学宙空電波科学研究センター, 2002.
  157. 杉山 徹, 松本 紘, 大村 善治, 衝撃波での粒子加熱現象, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  158. 笠羽 康正, 松本 紘, 向井 利典, ジオテイル衛星によるフォアショック・バウショック関連電子現象の観測: I, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  159. 村田 健史, 岡田 雅樹, 上田 裕子, 臼井 英之, 大村 善治, 松本 紘, マルチスケールプラズマシミュレーション技法および波動粒子相互作用への応用, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  160. 梅田 隆行, Peter H. Yoon, 大村 善治, 松本 紘, ブラゾフコードによるラングミュア高調波の計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.

161. 佐藤 学, 小野 高幸, 飯島 雅英, 熊本 篤志, 大家 寛, 橋本 弘藏, 松本 紘, kilometric radiation と kilometric continuum の関係-プラズマ圏内 kilometric radiation の磁気圏への放射特性について(あけぼの衛星と GEOTAIL 衛星の同時観測), 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
162. 橋本 弘藏, 笠原 禎也, 松本 紘, 長野 勇, 筒井 稔, 岡田 敏美, 岡田 雅樹, 笠羽 康正, SELENE WFC 班, SELENE 搭載低周波プラズマ波動観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
163. 新 浩一, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 向井 利典, バウショック下流における準正弦静電波動, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
164. 井町 智彦, 八木谷 聡, 長野 勇, 東 亮一, 筒井 稔, 松本 紘, レオメトリ実験による科学衛星搭載電界観測用ワイヤアンテナの特性解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
165. 村田 健史, 橋本 弘藏, 松本 紘, AKR 波源の3次元時系列可視化とレイトレーシングへの応用, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
166. 臼井 英之, 松本 紘, 荻野 竜樹, 藤本 正樹, スペースシミュレーション班, 宇宙シミュレーション・ネットワークラボラトリーシステムの開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
167. 小嶋 浩嗣, 米澤 祐一, 新 浩一, 臼井 英之, 松本 紘, プラズマ波動観測による電子温度推定, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
168. 三宅 壮聡, 富嶋 大輔, 岡田 敏美, 宮川 潤, 小嶋 浩嗣, 上田 義勝, 松本 紘, SS-520-2 ロケットによって観測された極域における ELF 帯波動の解析, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
169. 新 浩一, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 向井 利典, GEOTAIL 衛星観測によるバウショック下流における準正弦静電波動, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
170. 梅田 隆行, 大村 善治, 松本 紘, 臼井 英之, 二次元開放系プラズマにおける静電孤立波の形成過程, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
171. 大村 善治, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 水星ミッション・プラズマ波動班, 水星磁気圏におけるプラズマ波動観測の意義, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
172. 石坂 圭吾, 岡田 敏美, 早川 基, 松本 紘, 向井 利典, Geotail 観測データによる電子密度の比較, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
173. 井町 智彦, 八木谷 聡, 長野 勇, 東 亮一, 筒井 稔, 松本 紘, 科学衛星搭載電界観測用ワイヤアンテナに対する模型実験, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
174. 笠羽 康正, 岡田 敏美, 石坂 圭吾, 早川 基, 松岡 彩子, 小嶋 浩嗣, 八木谷 聡, 笠原 禎也, 松本 紘, 橋本 弘藏, 大村善治, 臼井 英之, 筒井 稔, 長野 勇, 三 BepiColombo/MMO の DC・低周波電場観測:PWI/EFD, 宅 壮聡, 村田 健史, 小野 高幸, 白鳥 裕, 岡田 雅樹, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
175. 小嶋 浩嗣, 八木谷 聡, 笠原 禎也, 笠羽 康正, 大村 善治, 松本 紘, 長野 勇, 筒井 稔, 橋本 弘藏, 岡田 敏美, 早川 基, BepiColombo MMO ミッションによる水星プラズマ波動観測器, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年

総合センター, 2002.

176. 上田 義勝, 藤原 亮介, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 斎藤 義文, 波動粒子相関計測器の小型軽量化に向けての検討, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
177. 二宮 啓輔, 大村 善治, 梅田 隆行, 松本 紘, 宇宙プラズマ中での電子・イオンホール形成に関する計算機実験, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
178. 宮川 潤, 三宅 壮聡, 岡田 敏美, 富嶋 大輔, 小嶋 浩嗣, 上田 義勝, 松本 紘, SS-520-2 ロケットによって観測された DC 電場及び光電子パルスの解析, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.

ウ 出版物

なし

## 研究成果



## 総括

衛星観測という立場では、現在あるデータを活用した研究と将来の衛星に搭載するための新しい観測器の開発という二つの流れで研究を行ってきた。なかでも、次期衛星観測において直接波動と粒子のエネルギー変換をとらえるための観測器、及び、軽量化プラズマ波動観測器の開発には最も力をいれたところである。イオン-波動-電子のカップリングを定量的に観測から押さえるためには、従来のような 1 機だけによる衛星観測では、時間と空間を分解できないため不十分である。つまり複数の衛星による同時観測が必要であるが、この際、イオンと電子の両方の空間・時間スケールを押さえる必要があるため、衛星間距離もイオンスケールのもの、電子スケールのもの、それぞれを設ける必要があり、4 機程度以上からなる編隊観測衛星が必要である。このような衛星に搭載するプラズマ波動観測器は、非常に軽量化され、なおかつ高度な能力を持ち備えたものである必要があり、従来からのアナログ技術をメインとした観測器ではとうてい搭載することはできない。そこで、我々は北極で行われたロケット実験に搭載するプラズマ波動観測器を、デジタル技術をメインとした観測器として設計し、開発を行った。ここで開発した観測器は次世代の編隊観測衛星に向けた次のような新しい技術が盛り込み、その開発に成功した。

1. 高速 CPU(日立 SH-3)と高速 DSP によるオンボードリアルタイムデータ・観測制御
2. オンボードソフトウェアによる、リアルタイム波形データ圧縮
3. Programmable Down Converter(PDC)によるデジタル型周波数掃引スペクトル受信器
4. モノポールアンテナ 2 本の組み合わせによるインターフェロメトリモード

これらの技術はいずれも、イオン-波動-電子カップリングを観測する編隊観測衛星では必須の技術であり、この開発の成功は非常に大きな価値がある。これらの観測器の具体的な性能、実際の観測データによる装置の評価については、添付研究成果資料 1 にまとめられている。

もう一つ衛星観測装置・技術の開発で重要な課題は、波動と粒子とのエネルギー変換過程を直接とらえようとする波動-粒子相関計(WPC: Wave-Particle Correlator)の開発である。従来、衛星観測データから、波動と粒子の相互作用をとらえるには、波動のデータと粒子観測から求められた速度分布関数との比較を行うというのがメインであった。しかし、波動データと粒子観測の時間分解能は 3 桁以上の開きがあるため、実際に波動と相互作用をしている粒子だけを速度分布関数の中からピックアップすることは至難の業である。そこで、波動と粒子のデータをオンボードで直に相関計算をすることにより、波動とエネルギーをやりとりしている粒子だけをとらえようとするのが WPC である。具体的には、バンドを絞った観測波形と、エネルギーレンジ毎に粒子計測器が計測する粒子 1 個 1 個のカウントパルスの相関をリアルタイムで計算していく。これにより、どのエネルギーレンジ、どの方向からやってくる粒子、と、現在、その場で観測されている波動とが一番エネルギーのやりとりを行っているかを特定することができる。従来、国外での観測ではこの WPC を使った例はあるが、本研究課題では、この WPC の性能評価を行うために計算機実験によるモデル計算を行った後、更に一歩進め、WPC の機能を一つの



FPGAの中に納めてしまい、ワンチップで相関がとれるワンチップデジタル型のWPCの開発・設計を行った(添付研究成果資料1)。この他、次期観測器に関する観測手法について、「熱ノイズによるプラズマ温度の推定方法」について理論計算、および、GEOTAIL衛星のデータを用いて評価を行い、電界センサーのノイズレベルをGEOTAIL衛星のものから1桁下げることによって実現できることを明らかにした(添付研究成果資料2)。

衛星データ解析では、地球の昼間側でのReconnection領域においてGEOTAILにより観測されたプラズマ波動データから、Reconnection領域においてホイッスラーモード波が観測されることを示した。ここでは、従来、アルフヴェン的なイオンのモードによるエネルギー解放のみしか議論されてこなかった磁気Reconnectionにおいてその高速な初期のエネルギー解放を電子の高速スケールで示すことができると言われてきた理論によく合うものであることを示した(添付研究成果資料3)。これにより電子のスケールでトリガーされたReconnection現象がイオンの領域へそして更にMHDの領域へと発展していくマイクロ-マクロスケール統合した発展モデル形成への足がかりを得ることができた。また、その他、磁気圏境界層で観測される低周波の低域混成波の強度が、朝方と夕方側で非対称性があることを観測データの統計解析から明らかにし、そこで発生しているイオンと電子のカップリング現象が、なんらかの理由で朝-夕非対称性が現れていることをつかんだが、その原因については引き続き解析中である。

計算機実験では、例えば、イオンビーム、電子ビーム不安定性が、ビーム成分および、背景プラズマにどのように依存するかをつぶさに調査した。このためには、粒子数を十分にいれ熱ノイズを抑えた非常に大規模な計算機実験を数多く行う必要があった。まず電子ビーム不安定性では、従来、周期境界で行っていたものを開放境界にしさらに2次元化することにより孤立した静電ポテンシャル構造の空間的時間変化を捉えることに成功した(添付研究成果資料4)。一方、イオン・電子ビームそれぞれの不安定性とその非線形発展が、背景プラズマのパラメータとどのような依存性をもつかを解析した。そして、その結果、非線形段階におけるポテンシャル構造の違いを調べることで、パラメータ領域を「Buneman領域」、「イオン音波領域」、「電子音波領域」の3つに分類できることを示した。これらは電子とイオンのダイナミクスとリンクしており、孤立したポテンシャルがイオンの擾乱を受けて崩壊していく現象などが確認された(添付研究成果資料5)。

以上に簡単にまとめたように、本研究課題では、衛星観測技術開発、衛星観測データ解析、計算機実験という項目毎に、イオン-波動-電子のダイナミクスを解明するための研究・開発を行ってきた。ここで得られた成果は、引き続き、最終年度前年度継続となった平成15年度以降の本研究課題へと引き継がれていく。

## 添付研究成果資料 1

### 科学衛星プラズマ波動波形観測の応用手法に関する研究

(平成 13 年度 藤原亮介君 京都大学修士論文(指導教官 松本紘 教授)より抜粋 )



## 第1章 序論

惑星やその周囲の機構の解明のために、現在まで様々なロケットや衛星による観測が行われてきており、大いなる成果を上げてきている。これらの実験による宇宙の仕組みの解明や技術の蓄積は、宇宙開拓の時代にむけて確実に大きな成果を残すものと考えられる。

特に地球周辺の地域についての研究は数々の衛星やロケットを用いた観測により飛躍的な発展をとげ、地球磁気圏の構造も細部まで明らかになりつつある。これらの観測において、地球磁気圏は地球の双極子磁場が太陽風プラズマの影響を受けて、吹き流し形状をしていることが明らかにされた。

このような磁気圏物理の研究の発展において、中心的な役割を担ってきた衛星やロケットを用いた観測において、重要な観測装置がプラズマ波動受信機である。一般的に宇宙空間では、粒子同士の衝突のない無衝突プラズマであり、このようなプラズマにおいては、粒子と粒子の間でエネルギーのやりとりは起こり得ないため、電場や磁場といった「場の量」を介してエネルギーのやり取りが行われる。したがって、太陽風や地球磁気圏の相互作用のメカニズムや構造を知るためには、プラズマ波動観測によるプラズマ波動の励起メカニズムや伝播メカニズムの解明が不可欠である。

日本の科学衛星である、AKEBONO[6, 8] や、GEOTAIL[10, 13] にもこのプラズマ波動受信機が搭載され、磁気圏プラズマ物理の発展に大きく貢献してきた。我が国の初の火星探査機である NOZOMI[15] には新しく設計されたプラズマ波動受信機が設備され、現在太陽軌道にのっており、2004 年に火星に到着する予定である。

これまでのプラズマ波動受信機は、データ伝送容量の制約によりスペクトル観測が主に行われてきたが、前述の GEOTAIL 搭載プラズマ波動受信機 PWI(Plasma Wave Instrument) の波形捕捉受信機 WFC(Wave-Form Capture) により初めてデジタル波形観測が行われてきて以来、波形観測の重要性の認識がなされてきている。事実、それ以後の様々な衛星やロケット実験において波形捕捉受信機が搭載されるようになった。

このような波形捕捉受信機の重要性が高まる中で、さらにテレメータ容量・重量の制約が厳しくなる惑星観測ミッションなどにむけて、さらなる波形捕捉受信機の技術的研究、または波形観測を応用とした観測技術の研究は必要不可

欠となっている。

2000 年 12 月にノルウェーのスバルバード諸島から打ち上げられた SS-520-2 号機ロケット実験には、様々な新しい技術が導入されたプラズマ波動受信機が搭載され、次世代のプラズマ波動観測につながる成功をおさめた [20]。

本研究では、様々な波形捕捉に対する新しい技術が導入された SS-520-2 号機ロケット実験搭載のプラズマ波動受信機を、実際に観測されたデータを用いて評価する。特に今回我が国で初めて搭載された、波形捕捉の応用観測であるインターフェロメトリ型受信機について評価・検討を行う。また次世代のプラズマ波動観測に向けて、もう 1 つの波形捕捉応用観測である波動粒子相関計測機に関して、評価・検討を行っていく。

本論文の構成は次のようになる。まず本章につづく第 2 章で、波形捕捉観測の重要性と有用性、また応用観測であるインターフェロメトリ受信機と波動粒子相関計測器の概要に触れる。第 3 章において、SS-520-2 号機ロケット実験搭載のプラズマ波動受信機の概要、評価、検討について述べる。特にインターフェロメトリ受信機について詳しく述べる。第 4 章において、波動粒子相関計測器の歴史、観測手法、および、シミュレーションを用いた検討について述べ、第 5 章では、実際に将来の観測ミッションへ向けた波動粒子相関計測器の設計検討を行う。最後に第 6 章において、本論文の結論を述べる。

## 第2章 波形捕捉受信機の重要性とその応用観測

本章では、まず波形捕捉受信機の重要性について述べ、その応用観測であるインターフェロメトリ型受信機と波動粒子相関計測器の概要を述べる。

### 2.1 波形捕捉受信機の重要性

前章でも述べたように、長らく宇宙プラズマ波動観測は、伝送容量などの技術的制約のためスペクトル観測が主に行われてきた。しかし、スペクトル観測では、電子の運動が直接関与して変化する時間スケールの速い物理現象や、非線形性が強くプラズマ中の波動波形の歪みが大きい現象を捉えることは難しい。事実 GEOTAIL 衛星搭載の周波数掃引受信機 (SFA: Sweep Frequency Analyzer) の時間分解能は約 8 秒であるのに対し、電子の運動的な時間スケールはミリ秒オーダーであり、この時間スケールではダイナミックに変化する物理現象を捉えることが出来ない。

しかし GEOTAIL 衛星には、初めて波形捕捉受信機である WFC が搭載され、波形捕捉受信機の重要性が認識されるようになった。例えば、図 2.1 に示すように、これまでのスペクトル観測だけでは、上段図のスペクトル図のように

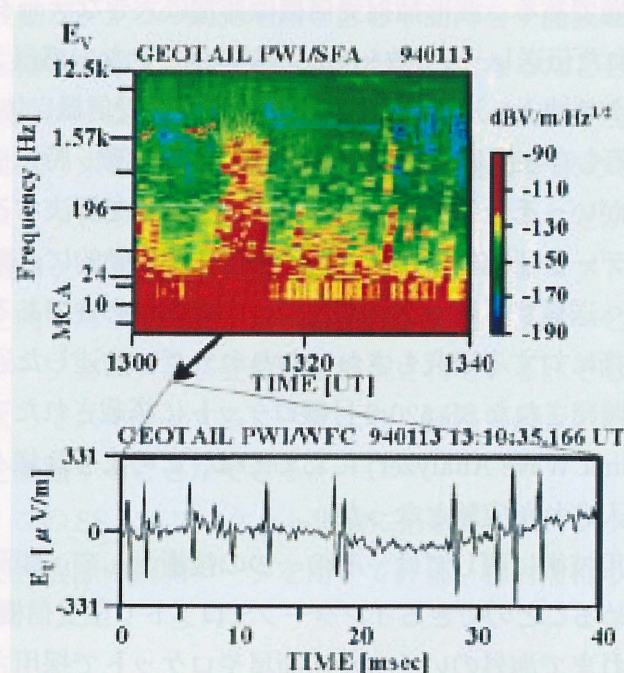


図 2.1: GEOTAIL WFC による ESW 観測例



広帯域にわたるスペクトル構造しかみて取ることしかできなく、その発生メカニズムが長らく解明されないままであった広帯域静電ノイズ (BEN: Broadband Electrostatic Noise) の波形を直接捉えることに成功した (下段図)。その結果、プラズマシート境界層で観測される BEN は単なるノイズではなく、バイポーラ状の孤立したパルス列から構成されており、その波形から静電孤立波 (ESW: Electrostatic Solitary Waves) と名付けられ [9, 10, 13, 14]、その後の計算機実験によりその発生メカニズムが提唱された [17, 18, 14]。このように、この GEOTAIL 衛星による波形の直接観測が非線形プラズマ物理学において、非常に大きな寄与をもたらした。

電子のダイナミクスに支配されるような時間スケールで変化する物理現象をとらえるためには、波形捕捉受信機は必要不可欠であり、実際に GEOTAIL 衛星においてその有用性が確かめられた。

波形捕捉観測に関する研究項目は大きく二つの流れに分けられる。一つは、データ処理技術に関する研究であり、もう一つは波形データを利用した観測技術の研究である。データ処理技術に関して述べると、プラズマ波動受信機、特に波形捕捉受信機は宇宙から遠く離れた場所で観測し、地上へ観測データを伝送するので、いくつかの技術的な問題点を持つ。一番大きな問題は地上へのデータ伝送容量の問題である。波形捕捉受信機は非常に大きなデータを扱うことになるため、限られた伝送レート (数 kbps) しか確保できない惑星ミッションでは全ての観測データを地上へ送ることは難しい。また、受信機自体の重量の問題、消費電力の問題等も存在する。将来の衛星・ロケット実験、特に惑星探査などではこれらの要求がますます厳しいものとなる。これらを解決する為に、データ量を少なくするデータ圧縮技術、また観測機自体が自動的に必要なデータだけを判別して地上へ送信するデータ判別技術等の研究が必要である。本研究室ではこのような技術に対する研究もされており [12, 7]、前述した通り本研究室の研究グループで開発された SS-520-2 号機ロケットに搭載されたプラズマ波動受信機 (PWA: Plasma Wave Analyzer) においては、このような様々な新しいデータ処理技術が導入された実験となった。

波形観測の応用技術に関しては、その一つの技術として、観測波動の位相速度又は波数を求めることのできるインターフェロメトリ型受信機があげられる。この技術は、これまで海外のいくつかの衛星やロケットで採用されている。この受信機はこれまで日本のミッションに採用されたことはなかったが、これも

SS-520-2 号機ロケット実験において、日本で初めて採用された。もう一つの波形捕捉観測の応用観測として波動粒子相関計測器があげられる。この技術においても、WIND 衛星、FAST 衛星、CRRESS 衛星などの欧米のミッションにおいて採用されているが [3, 21]、日本ではまだ搭載されたロケットや衛星はない。

今後、詳細な物理現象の解析や、高度な性能を持つ観測機が要求される将来の宇宙科学観測ミッションに向けて、これらの観測技術に関する研究を行い、我が国独自の技術として開発しておくことは非常に重要である。

## 2.2 インターフェロメトリ受信機

線形伝播波動の特徴を示す量は、振幅、波数ベクトル、周波数である。しかし、これまでのスペクトル受信機が主流のプラズマ波動受信機においては、振幅と周波数のみしか測定することができなく、また従来の波形捕捉受信機でも波数ベクトルを測定することはできない。この波数ベクトルを測定する 1 つの方法が、インターフェロメトリ方式の受信機である。インターフェロメトリ受信機とは、2 点以上の多地点で波形の観測を行い、波動の位相速度を測定するものであり、周波数とあわせ、波数ベクトルを求めることができる。

インターフェロメトリ受信機の原理を 2 地点観測の場合で説明する。ある位相速度を持つ波動が、2 つの観測地点を含む平面内を平面波として伝播すると仮定すると、伝播方向が 2 地点を結ぶ線分と平行になったとき、経路差が最大になるので観測のタイムラグが最大になる。このタイムラグを相互相関関数を計算することにより求め、それと経路差から位相速度を求めることができる。またその時のロケットの姿勢により伝播方向も推定することができる。

SS-520-2 号機ロケット実験に搭載されたインターフェロメトリ型受信機は互いに反対方向を向いた二つのモノポールアンテナをセンサーとして用いることにより、インターフェロメトリ受信機が実現されている。そして、ロケット本体のスピンのによってスキャンすることにより、経路差最大の点を探し、伝播方向と位相速度を議論することができる。

本研究では、この SS-520-2 ロケット実験に搭載されたインターフェロメトリ受信機について、実際の観測データを用いて評価、検討を行う。

## 2.3 波動粒子相関計測器

前々節で述べたように、波形観測を用いた観測として、もう1つあげられるのは波動粒子相関計測器である。第一章で述べたようにプラズマ波動観測は、波動と粒子の相互作用のメカニズムを解明するために行われるが、これまでは波動の観測データと粒子の観測データを地上で相関解析して解析を行ってきた。しかしながら、相互作用が起っている時間スケールは非常に短いため、一般的に粒子観測機で速度分布関数を求めるような時間分解能では、相互作用を捉えることができない。そこで、この波動と粒子の相互作用を、衛星やロケットの機上で直接観測する技術が波動粒子相関計測器であり、これにより直接的に共鳴粒子や相互作用に関する情報を得ることができる。

この波動粒子相関計測器は、主にカリフォルニア大学バークリー校のグループが中心となって開発されており、前々節で述べたようにこれまでいくつかの衛星やロケット実験において採用されている [3, 21]。本研究ではその技術を基本とした、波動粒子相関計測器の評価を行い、将来の宇宙観測ミッションに向けた設計の検討を行っていく。主にここで取り上げる項目は以下の通りである。

1. 波動粒子相関計測器の仕組み、理論
2. 各波動の発展段階における波動粒子相関計測器の観測結果の傾向
3. 現在の観測の限界と新しい設計

1. においては、過去に行われてきたミッションを参考にして論じ、2. については、実際に本研究グループで開発された静電粒子コードを用いた計算機シミュレーションによって確かめる。そして、最後に現在の観測の限界とそれらをふまえた新しい波動粒子相関計測器の提案を行う。



## 第3章 北極ロケット実験プラズマ波形受信機の評価

本章では、様々な新しい技術、特に波形捕捉に関する技術が採用された SS-520-2 号機ロケット実験プラズマ波動受信機について述べる。まず 3.1 節でロケット実験の概要・目的、及びプラズマ波動受信機の概要、仕様を述べる。3.2 節でデータ較正法について述べ、3.3 節で実際に観測された例にデータ較正を施し紹介する。3.4 節では採用されたデジタル技術の評価を行う。そして 3.5 節で波形捕捉技術の応用観測であるインターフェロメトリ受信機について評価を行う。

### 3.1 北極ロケット実験プラズマ波動受信機の目的・概要

#### 3.1.1 ロケット実験概要

地球磁気圏の極域上空に位置するカスプ領域では、水素イオンや電子の他に、電離圏の酸素イオンなどの重イオンも磁気圏外部に向かって流出する現象がしばしば観測されている。従来の理論では、酸素などの重イオンの場合は地球重力の束縛の為に脱出不可能とされてきた。そのため、カスプ領域内では従来の理論とは別の特別な加速加熱機構が働いていると考えられている。この重イオン加速加熱機構を解明するため、我々は宇宙科学研究所と協力して、SS-520-2 ロケット実験を 2000 年 12 月 4 日にノルウェーのスバルバード諸島にあるニーオルソンにて行った。このロケット実験は、カスプ領域でのイオンの加速・加熱にかかわる粒子観測とプラズマ波動観測を重点に置き、これらの観測を高時間分解能で行うことにより、加速・加熱のメカニズムを十分捕らえることができる仕様となっている。この SS-520-2 号機の観測機器が搭載されている頭胴部の全体図を図 3.1 に示し、搭載機器を表 3.1 に示す。

我々は、この SS-520-2 ロケット実験に搭載したプラズマ波動受信機 (Plasma Wave Analyzer、以下 PWA)(図 3.3) の開発を担当した。この PWA は、上述のようなカスプ領域でのイオンの加速・加熱機構の解明という理学的な目的に加え、将来の宇宙科学衛星ミッションへ向けての技術開発・試験という工学的な目的を持っている。将来の宇宙科学衛星ミッション、特に惑星ミッションでは、その搭載観測機の性能は様々な意味で高度なものが要求される。

このような将来の科学衛星ミッションにおける技術的要件を満足させる最大の要素は、衛星観測へのデジタル技術の導入である。特に伝統的にプラズマ波動受信機は、アナログ回路を主体として開発されており、第 1 章で述べた



図 3.1: SS-520-2 号機ロケット全体図

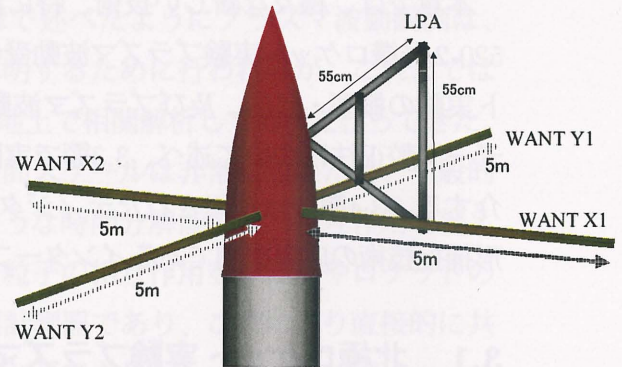


図 3.2: センサー概略図

表 3.1: SS-520-2 ロケット実験搭載機器

TSA	<i>Thermal and Suprathermal ion Analyzer</i>
ISA	<i>Ion Spectrum Analyzer</i>
TECHS	<i>Thermal Electron Capped Hemispherical Spectrometer</i>
ESA	<i>Electron Spectrum Analyzer</i>
<b>PWA</b>	<i>Plasma Wave Analyzer</i>
XUV	<i>XUV 83.4-nmphotometer for remote sensing of oxygen ions</i>
NEI	<i>Number of Electron density by Impedance probe</i>
TEL	<i>Temperature probe for Electron</i>
MGF	<i>MaGnetic Field instrument</i>

NOZOMI 衛星搭載のプラズマ波動観測機において、初めて CPU/DSP による機上での FFT 処理などのデジタル処理が行われるようになった。

本 SS-520-2 ロケット実験 PWA では、この NOZOMI 衛星のプラズマ波動観測機からさらに高度なデジタル技術を導入されており、特に高時間分解能の波形捕捉受信機が実現された。



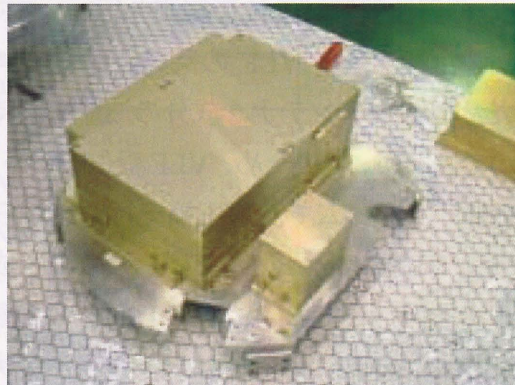


図 3.3: PWA メインエレキ部 搭載図

### 3.1.2 プラズマ波動受信機の仕様

本ロケット実験に搭載する波動受信機では、主にイオンのダイナミクスが支配的となる周波数領域に的を絞った波形受信機と電子の周波数領域をみるスペクトル受信機からなる。まずセンサーとしては、電界測定用のワイヤアンテナ (10m tip-to-tip) 2 組と、三角形形状の磁界測定用ループアンテナ (一辺 50cm) を用いる。受信機としては、VLF (Very Low Frequency) 受信機 (電界成分観測用 2 機、磁界成分観測用 1 機)、EFD (Electric Field Detector) 受信機 (直流成分観測用 2 機)、HF (High Frequency) 受信機 (電界成分観測用 1 機) が搭載された。図 3.4 に PWA の構成図をしめす。

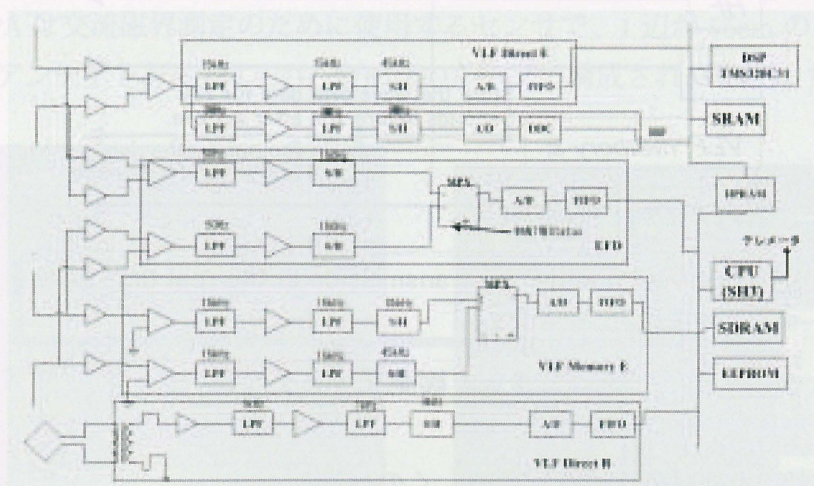


図 3.4: PWA ブロック図





表 3.2: タイマ信号

Event	Time from Launch[s]
LPA Extension	105
WANT Extension	155
WANT Stop	183
VLF Memory Write Start	410
VLF Memory Repro Start	770

PWAに搭載しているセンサは電界測定用のワイヤアンテナ(以下、WANT:Wire antenna)と、磁界測定用のループアンテナ(以下、LPA:Loop antenna)である。図 3.2 にセンサーの配置とサイズを示す。

WANTは直流、交流電界を測定するためのセンサである。直径0.58mmの被覆Be-Cu線を用いており、その長さは1機で5mとなっている。このWANTを4機配置し、2機ずつを対角線上に置くことで(図 3.6)、計2組の全長10mのダイポールアンテナに相当することになる。先端1mは直流電界測定の為に被覆を除去し、その部分及び先端のチップマス(伸展時の重心となるようにアンテナ先端に取りつけられている)は、光電子放出を均質化するためにアクアダックでコーティングされている。伸展はモータドライブによって行われる。

LPAは交流磁界測定のために使用するセンサで、1辺が55cmの三角形形状のアンテナである(図 3.7)。台形状のループで構成され、巻数は10ターン

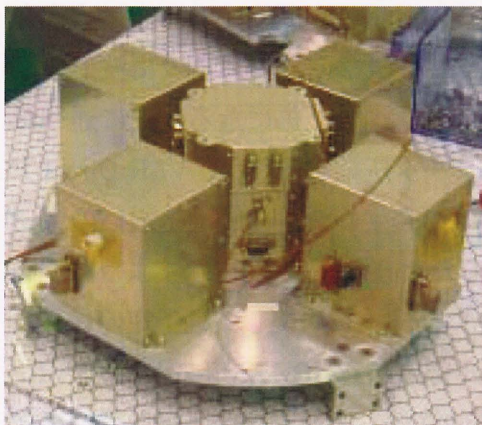


図 3.6: WANT 搭載図



図 3.7: LPA 搭載図

である。電気系統などから起因する誘導電流ループによる磁界の励起を避けるため、ループアンテナの骨格は電氣的にループとならないよう接合部で絶縁が施されている。

- **VLF Direct E**

VLF Direct E は、WANT の X成分をダイポールアンテナとして使用した 10Hz~15kHz までの波形を直接観測する受信機である。サンプリング周波数は、エリアジングを避けるため 45kHz としている。A/D コンバータはダイナミックレンジをできるだけ広くとるため 16bit のものを用いている。ダイナミックレンジは 90dB、最大入力  $141.95\text{mV}_{\text{pp}}/\text{m}$  である。観測値はサンプルホールド回路 (以下、S/H) によって値が保持されたあと、デジタル変換されて FIFO 型メモリ (以下、FIFO) へと格納される。この S/H のタイミングは成分間の位相誤差を少なくするために、以下の VLF Memory E と同一のタイミングで行われている。

VLF Direct E で取得されたデータは、本実験において PWA に割り当てられているデータ容量では、リアルタイムで地上へ送ることができないため、サブバンド分割による波形圧縮をもちいて、VLF Direct E の波形データを 1/4 に圧縮し、リアルタイムにデータを地上伝送する。実験において、以上のような所望の観測を行うことに成功した。

- **VLF Memory E**

VLF Direct E と同じ周波数帯域を Y 成分の WANT を用いて直接観測する。VLF Memory E は VLF Direct E と違い、Y 成分の WANT 2 本をそれぞれモノポールアンテナとして使用するインターフェロメトリ型受信機となっている。ダイナミックレンジは VLF Direct E と同じ 90dB 最大入力は差動を取った場合において  $141.95\text{mV}_{\text{pp}}/\text{m}$  である。2 本別々に波形を観測するため、データ量が VLF Direct E と比べて 2 倍になる。先に述べたように、電界波形の観測はデジタルデータ圧縮を行うが、VLF Direct E と VLF Memory E の双方の観測データの発生レートは、地上送信のデータ量を大きく越えてしまうため、上述したように、図 3.5 に示すような観測シーケンスになっている。これは、VLF Direct E に関しては予定の最高高度の前後 3 分の観測を行ってデジタル部にある SDRAM に保存し、VLF Direct E の観測が終了 (打ち上げ後 770 秒) 後、デジタル圧縮を行いながら VLF Memory E の地上への伝送を開始する。

- **VLF Direct B**

ループアンテナを用いた観測周波数 1Hz～1kHz の交流磁界波形受信機である。サンプリング周波数は 3kHz であり、A/D コンバータの出力は 14bit である。最大入力 は 48pT/Hz(1kHz)、最小入力 は 0.1pT/Hz(1kHz) である。CODEC による疑似 log 圧縮を CPU にて行い、8bit データに変換し、地上へ伝送している。

- **EFD**

直流電界波形受信機であり、観測周波数は 0～50Hz で、WANT X,Y の 2 成分の電界波形の観測を行う。打ち上げ時にはロケット本体が約 1.5Hz で回転するため、直流電界は EFD では約 1.5Hz の正弦波として観測される。ダイナミックレンジは 90dB で最大入力 は 10V<sub>pp</sub> である。

- **HF**

観測周波数 10kHz～3MHz のスペクトル受信機で、WANT X 成分をダイポールアンテナとして使用する。このスペクトル受信機は、今回初めて PDC(Programable Down Converter)を用いたデジタル周波数掃引スペクトル受信機となっている。0Hz～3MHz までの帯域をそれぞれ 150Hz ごとの 20 周波数帯に分割して、PDC により周波数変換した後、順次 FFT 処理を行い、得られたスペクトル情報を地上へ伝送する。実際には、広帯域にわたって等間隔の周波数ステップでは効率が悪いので、表 3.3 に示すようなバンド幅に変更して地上へ送信している。最大入力 1.5V<sub>pp</sub> で、平均掃引時間は 450ms である。

表 3.3: HF 周波数分解能とデータ点数

Frequency Band[kHz]	Data points	$\Delta f$ [kHz]
0～150	256	0.586
150～300	128	1.17
300～600	128	2.34
600～1,050	96	4.69
1,050～3,000	208	9.38

### 3.1.3 デジタル技術

先に述べたように将来の衛星・ロケット実験、特に惑星探査などのミッションに搭載する観測装置においては、軽量化、高性能化が要求される。このような観測装置を実現するにはデジタル技術を用いたプログラム制御による観測機の開発が必須である。PWAにおいても、高時間分解能の波形観測、スペクトル観測を行うために、様々な新しいデジタル技術が導入されている。まず、スペクトル受信機の軽量・高性能化のために PDC を搭載しており、CPU、DSP を搭載することで、ソフトウェア制御による柔軟なプログラム制御を行うことができる。データ圧縮もデジタル部で行うため軽量で高性能な観測機を実現することができた。

CPU 部においては、ロケット本体から送られてくる同期信号にあわせて、各受信機の制御、各受信機からのデータの取得、各受信データのテレメトリチャンネルの割り当て、テレメータ送信、DSP との通信、VLF Memory E 観測データのメモリへの書き込み及び読み出し、PWA の各アンテナ長や主電源の電圧値の監視、CODEC による磁場波形圧縮を行う。

DSP 部においては、VLF Direct E のデータを DMA(Direct Memory Access) を利用して FIFO から取得し、データ圧縮処理を行う。余った時間で PDC から取得したデータをスペクトル情報に変換する。また、地上伝送の際に圧縮データが抜け落ちた場合に、抜け落ちた部分がわかるための情報を付加する作業も行っている。

このように限られた通信容量を有効に活用し、さらにミリ秒単位の瞬時の物理現象を取り損なわないように、各受信機から得られるデータを遅延なく取得しつつ、VLF Memory E データ以外のそれぞれのデータをリアルタイム圧縮しながら地上に伝送している。

## 3.2 データ較正

### 3.2.1 較正方法

観測された波動の振幅や異なるセンサーとの位相差の正確な値を得るためには、テレメトリによって送られてきたデジタルデータを回路の特性を考慮して較正する必要がある。ここでは、VLF Direct E、VLF Memory E、HF のデータ較正に関して述べる。

VLF Direct E、VLF Memory E は波形受信機であり、振幅と位相の情報を



もっているため、その両方に対して較正を行う必要がある。図 3.4 で示したように、アンテナから入力された信号は、プリアンプ、メインアンプを通り、 $\pm 5V$  の A/D コンバータで 16bit のデジタル情報になる。このデジタル情報から物理量にするためには、A/D コンバータ入力電圧を  $V_{A/D}(f)$  とすると、

$$V_{A/D}(f) = G_{\text{preamp}}(f) \cdot G_{\text{mainamp}}(f) \cdot V_{\text{ANT}}(f) \quad (3.1)$$

の関係から、アンテナ誘起電圧  $V_{\text{ANT}}(f)$  を求めることが出来る。ここで  $G_{\text{preamp}}$  は WANT プリアンプの複素伝達関数、 $G_{\text{mainamp}}$  はメインアンプ部の複素伝達関数である。したがって較正の手順としては、地上で取得されたデジタル値の波形データを電圧値に戻しフーリエ変換を用いて  $V_{A/D}(f)$  を求め、式 (3.1) により  $V_{\text{ANT}}(f)$  を得、それを逆フーリエ変換してアンテナ誘起電圧を求めことが出来る。HF では、得られるデータはもとよりスペクトル情報であるので、フーリエ変換の必要はない。

VLF Direct E、HF の場合、ダイポールアンテナを用いて観測されているので、求めた電圧値は二つのアンテナの電位差であり、電界強度を求めるためには、ダイポールアンテナの実効長  $l_{\text{eff}}$  とし、

$$E = V_{\text{ANT}}/l_{\text{eff}} \quad (3.2)$$

により求めることができる。

### 3.2.2 各部の伝達関数

先に述べた通り、データを較正するためには、受信機の回路の伝達関数  $G_{\text{preamp}}$ 、 $G_{\text{mainamp}}$  を知らなくてはならない。

プリアンプ、メインアンプの伝達関数は打ち上げる前に実測により測定してある。プリアンプ単体の伝達関数を図 3.8 に、VLF Direct E のメインアンプ部の伝達関数を図 3.9 に示す。いずれも上段がゲイン特性、下段が位相特性を示す。 $G_{\text{mainamp}}$  はこのような打ち上げ前に測定した測定値をそれぞれ用いる。しかし、 $G_{\text{preamp}}$  は、アンテナからプリアンプまでの伝達関数であることより、測定した伝達関数をそのまま用いることは出来ない。したがって、アンテナからプリアンプまでの等価回路を求め、計算により  $G_{\text{preamp}}$  を求める。アンテナ片側のみの等価回路を図 3.10 に示す。

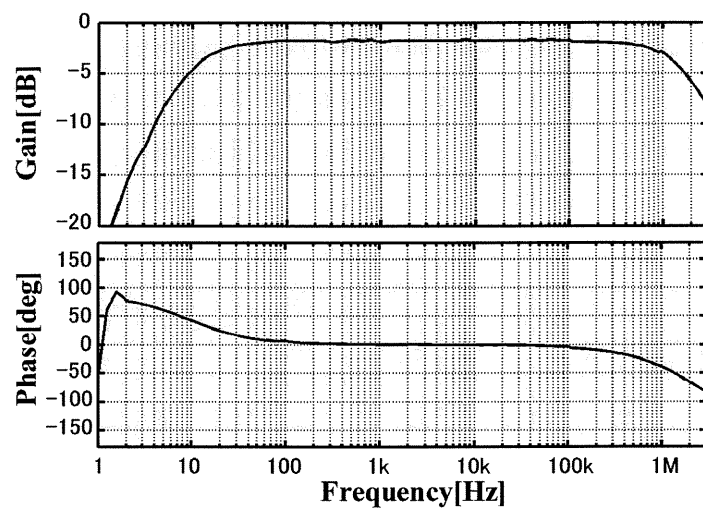


図 3.8: プリアンプ特性 上:周波数特性 下:位相特性

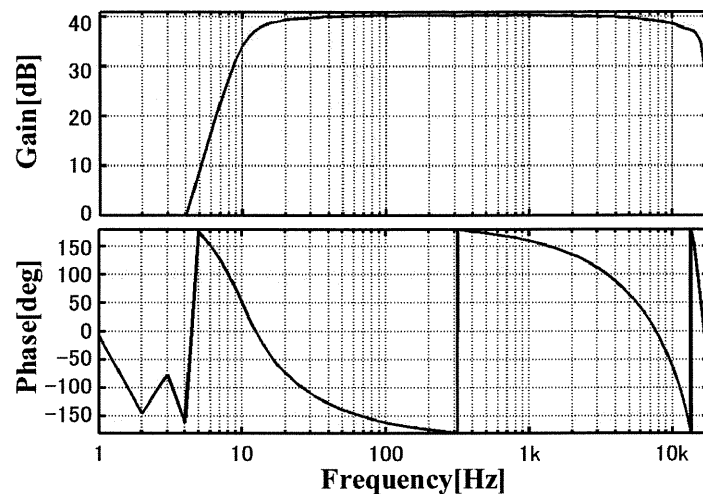


図 3.9: VLF Direct E メインアンプ特性 上:周波数特性 下:位相特性

図中の  $Z_a$ 、 $C_c$ 、 $C_i$  はそれぞれアンテナインピーダンス、アンテナからプリアンプに接続するケーブル容量、プリアンプの入力容量である。実線で囲まれた部分はテレメータトラップである。

プラズマ中の  $Z_a$  は一意に決定することができないが、ここでは真空中の値を用いて計算する。真空中で波長に対し、アンテナ長が十分短い場合ダイポールアンテナのインピーダンスは容量性を持ち、その容量は、[Carter 1932] の式を用いて、

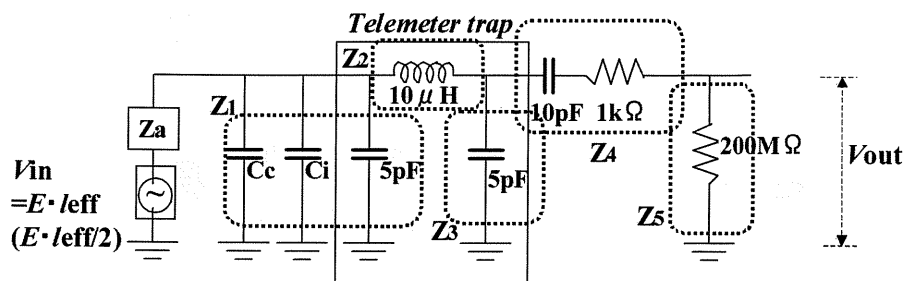


図 3.10: WANT プリアンプ等価回路 (片側)

$$C = \frac{l}{120c \log\left(\frac{2l}{a}\right)} \quad (3.3)$$

と表される。ここで、 $l$ はダイポールアンテナ片側の長さ、 $c$ は光速、 $a$ はアンテナの半径である。PWA WANTは10m tip-to-tip、芯線外径0.38mmのため、 $l=5\text{m}$ 、 $a=2 \times 10^{-4}\text{m}$ を代入すると、 $C_a = 13\text{pF}$ を求めることができる。これを図 3.10のようにアンテナ片側のみの等価回路で考えると、 $C_a = 26\text{pF}$ となり、これを  $Z_a$ として用いる。

またケーブル容量に関しては打ち上げ前の実測で  $C_c=19\text{pF}$ である。プリアンプの入力容量に関しては、実測で  $30\text{pF}$ であるが、図 3.10のようにテレメータトラップの容量が  $10\text{pF}$  ( $5\text{pF} \times 2$  個) あるので、これを除いた  $C_i=20\text{pF}$ として計算する。

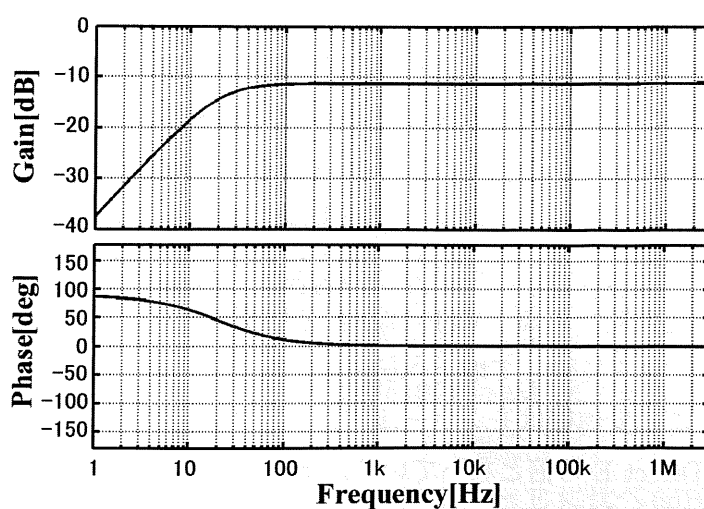


図 3.11: WANT プリアンプピックアップ特性 上:周波数特性 下:位相特性

よって、図 3.10におけるポイント A から B までの伝達関数を

$$G_{\text{preamp}}(f) = \frac{Z_1 \parallel Z_{3-5}}{Z_a + Z_1 \parallel Z_{3-5}} \frac{Z_{3-5}}{Z_2 + Z_{3-5}} \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad (3.4)$$

$$(Z_{3-5} = Z_3 \parallel (Z_4 + Z_5))$$

のように求めることができ、それを図 3.11に示す。ただし図 3.8の実際のプリアンプ単体の計測では 2dB ほど損失が認められたため、図 3.11は-2dB したものを図示したものである。これによって求められた伝達関数を  $G_{\text{preamp}}(f)$  として用いる。

### 3.3 各搭載受信機の観測例と性能評価

ここでは、我々が解析を担当する VLF Direct E、VLF Memory E、HF 受信機に関して、前節で示したデータ較正を施した観測例を示し、各受信機の評価を行う。

#### 3.3.1 VLF Direct E、VLF Memory E

WANT X成分をダイポールアンテナで波形観測をおこなう VLF Direct E は打ち上げから 770 秒後の観測終了まで正常に観測を行い、データを抜け落ちなく全て地上へ送信することを成功した。その観測例を図 3.12に示す。上の図がある時刻におけるロケットからテレメトリにより送られてきた圧縮データを地上で解凍して A/D コンバータの出力のデジタル値に戻した波形データであり、下の図がそのデータに前節の較正をおこなったあとの波形データである。図 3.12を見ると、8kHz 付近にピークの周波数を持つヒスと呼ばれる波動が観測されている。この波動の振幅は最大入力レベル程度の大きさのものもあり非常に強度の強い波動である。しかし全観測を通して受信機が飽和している様子はないため、VLF Direct E のゲイン設定は適切であったと考えられる。

一方 VLF Memory E は、WANT Y成分をモノポールアンテナ 2 本を用いて波形観測する受信機である。VLF Direct E 観測終了後、SDRAM に保存してあった波形データを圧縮して地上へ伝送し、約 180 秒間の波形データの取得を成功させた。この受信機はモノポールアンテナで観測することにより、ゲイン設定が VLF Direct E の倍となっている。地上で各 WANT Y成分を、Y1、Y2 の差動をとりダイポールアンテナとした時の最大入力値は VLF Direct E と同じ

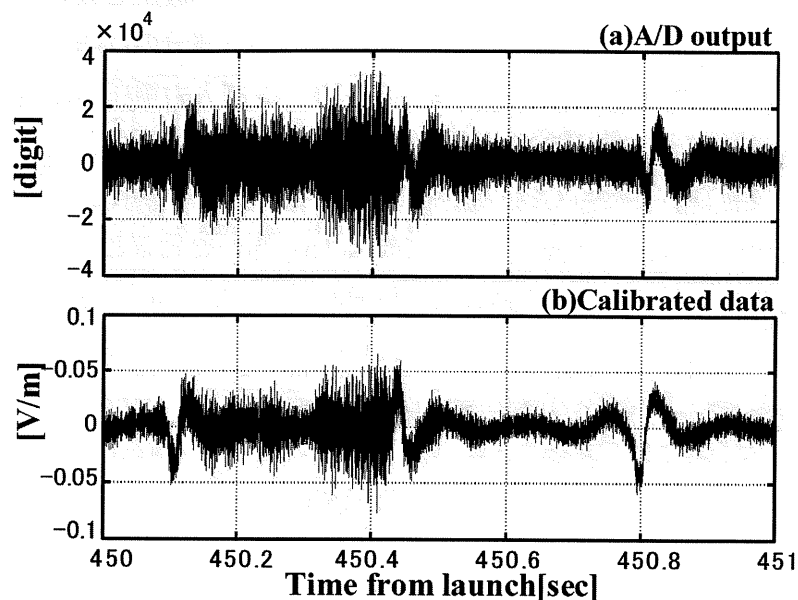


図 3.12: VLF Direct E 観測例 (a)A/D コンバータ出力波形 (b) 受信電界強度

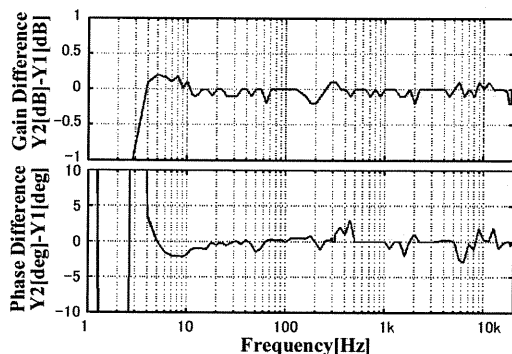


図 3.13: VLF Memory E の各成分のメインアンプ特性差

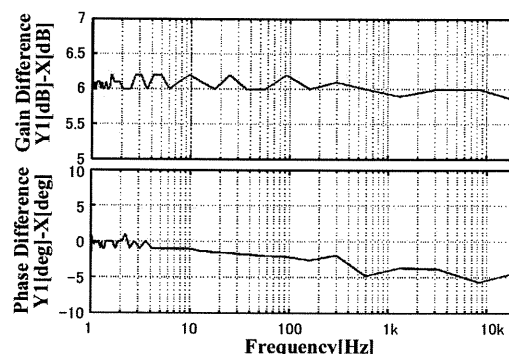


図 3.14: VLF Direct E と VLF Memory E のメインアンプ特性差

141.95mV<sub>pp</sub>/m である。打ち上げ前に測定した各成分の受信機の回路特性の差を図 3.13に示す。上段がゲイン差を示しており、下段が位相差を示しており、観測帯域ではほぼ特性に違いがないことがわかる。また同様に VLF Direct E と VLF Memory E の片側 1 チャンネルの受信機の回路特性の差を図 3.14に示す。VLF Memory E の入力は一ポールアンテナで観測するために VLF Direct E の半分程度になるので、回路のゲインは VLF Direct E に比べ 6dB あげてある。

図 3.15に観測例を示す。VLF Direct E と同様に (a) が Y1 成分の圧縮データ

解凍後の A/D コンバータの出力値、(b) がそれにデータ較正を施し、プリアンプ入力電圧値に換算した波形データ、同様に (c) が Y2 成分の圧縮データ解凍後の A/D コンバータの出力値、(d) がそれをプリアンプ入力電圧値に換算したものである。そして、各プリアンプ入力換算電圧値を引き算して、アンテナの実効長で割ったもの、すなわち電界強度に直したものを (e) に示した。

各成分をデータ較正した後のデータである (b)、(d) を見ると、矩形波のような波形を見ることができる。差動を取った後のデータである (e) を見ると、そのようなデータは見ることが出来ないことから、これは自然の波動ではない、他の搭載機器による電氣的ノイズと考えられる。このように、Y1 と Y2 に同相で入力されるノイズはコモンモードノイズと呼ばれ、VLF Direct E においては機上で差動を取るため、そのようなノイズは受信されない。今回このようなコモンモードノイズで大幅なダイナミックレンジの低下が見られなかったので、観測は良好に行われたといえる。

VLF Memory E の両成分の観測データをデータ較正後に差動を取り受信電界強度波形をみると、VLF Direct E と同じ様な波動が観測されており、振幅も変わらないことから、差動を機上で取った時と地上で取った時の結果はほぼ変わらず正しく観測が行われたと言える。

また VLF Direct E と VLF Memory E とともにパルス状の波形を見ることができる。これは、ロケット本体のスピン周期に同期していることから、自然の波動ではなく、アンテナがロケット本体により太陽の影に入った時の光電子放出の影響によるノイズと考えられる。その時の観測波形とロケットのアンテナ角度との関係は図 3.16 に示したようになる。上から WANT X 電界波形、WANT Y1 アンテナ受信電圧、WANT Y2 アンテナ受信電圧、WANT Y 電界波形波形を示しており、その下にロケット本体の姿勢の模式図を書いた。この図より、アンテナがロケット本体の影に入ったとき、光電子放出のバランスが崩れ、ポテンシャルに変動が起き、パルス状の波形が観測されることを示している。



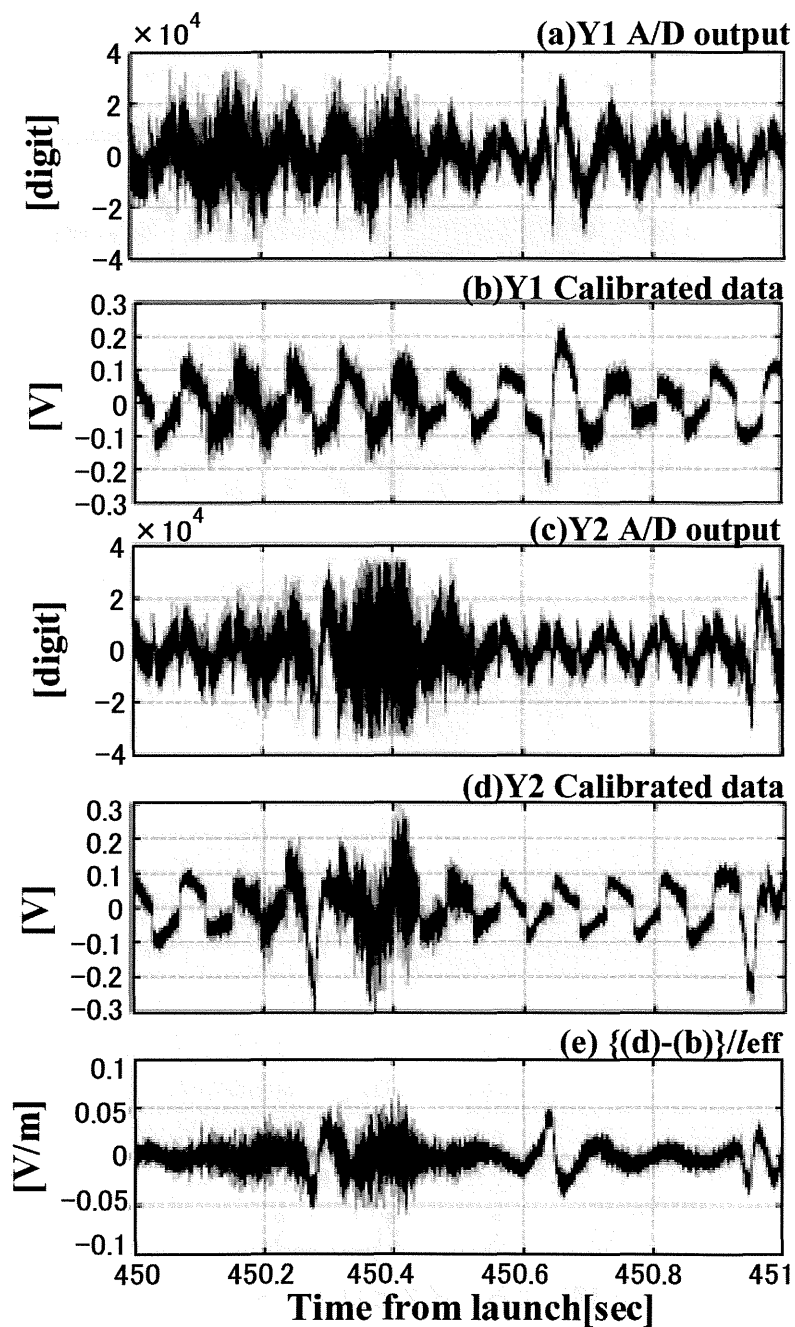


図 3.15: VLF Memory E 観測例 (a)WANT Y1 成分 A/D コンバータ出力波形 (b)WANT Y1 成分プリアンプ入力電圧換算波形 (c)WANT Y2 成分 A/D コンバータ主力波形 (d)WANT Y2 成分プリアンプ入力電圧換算波形 (e)WANT Y 成分受信電界強度  $\{(d)-(b)\}/l_{\text{eff}}$

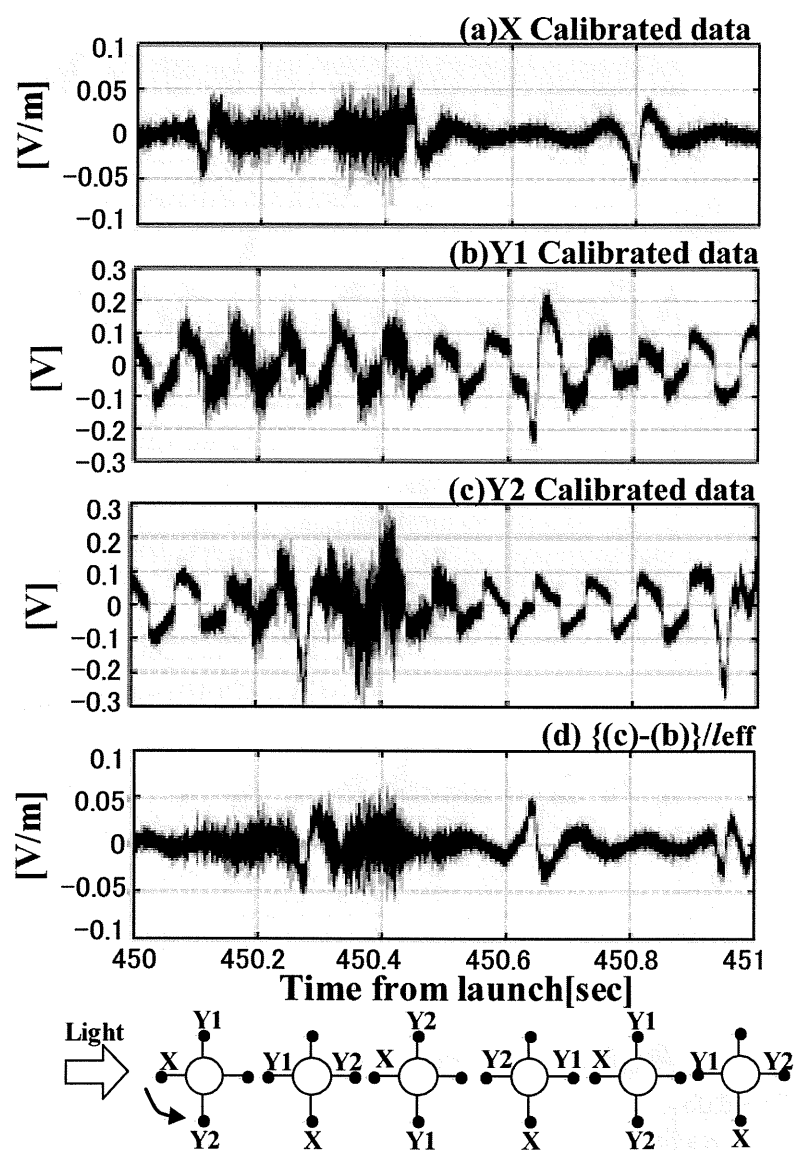


図 3.16: 光電子放出の影響によるノイズとロケットの関係 (a)WANT X 電界波形 (b)WANT Y1 アンテナ受信電圧 (c)WANT Y2 アンテナ受信電圧 (d)WANT Y 電界波形

### 3.3.2 HF

HF は WANT X成分のスペクトル観測を行う。HF のメインアンプ部の伝達関数を図 3.17 に示す。それらを用いデータ校正した全観測時間の観測データを図 3.18に示す。(a) が周波数 10kHz~3MHz までの周波数時間スペクトラムグラムで (b) が周波数 10kHz~1MHz までの周波数時間スペクトラムグラムである。HF の観測結果においてもヒスと呼ばれる波動が観測されていることがわかり、良好に観測が行われたといえる。

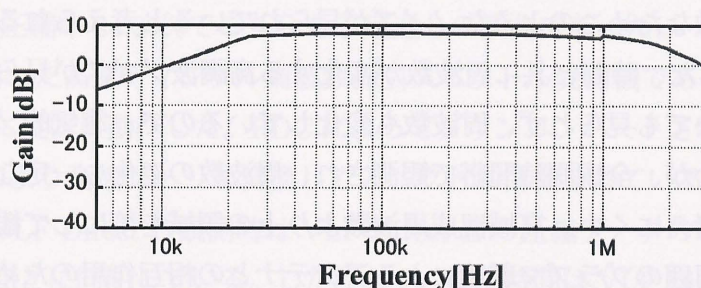


図 3.17: HF メインアンプ伝達関数

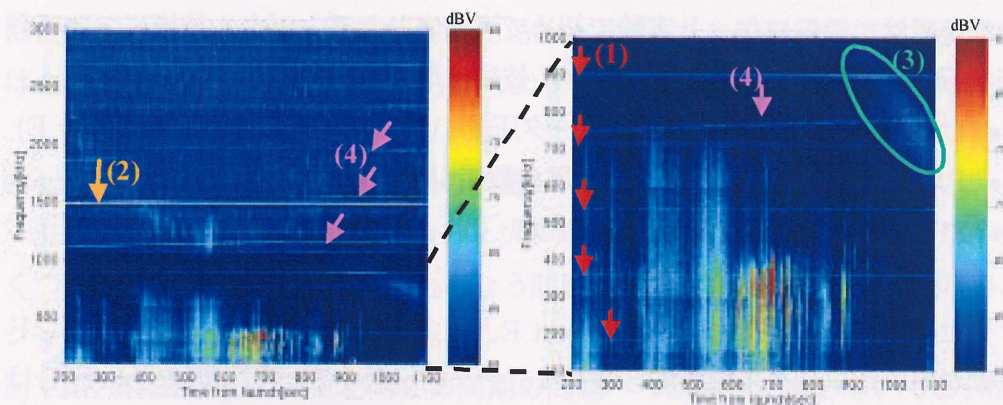


図 3.18: HF 観測例 (a) 周波数 100kHz~3MHz (b) 周波数 100kHz~1MHz

しかしながら、いくつか自然の波動とは思われないところもあり、以下、ノイズと自然の波動との切り分けを行う。

まず、図中 (1) で示した 180kHz の高調波が見られる。これは打ち上げ前の単体試験時においても見られ、PWA 内部の電氣的ノイズであると思われる。次に



図中 (2) で示した約 1.5MHz 付近に強度が強くなっている。これは全観測時間中ある周波数で一定の強度であり、また単体試験時においても見られていることからこちらも PWA 内部の電氣的ノイズと考えられる。基板上のスイッチドキャパシタフィルタが 1.5MHz のクロックを用いており、そのクロックがのってしまったのではないかと考えられる。図中 (3) で示したように観測の最後の方には薄いスペクトルがみられる。これは、打ち上げ前の真空試験時に、A/D コンバータの温度が上昇した時に現れたノイズと酷似していることから、これも自然の波動ではなくノイズであると考えられる。真空中では、デバイスの温度上昇が急激なためこのようなノイズが見られていると考えられる。最後に図中 (4) で示した、時間と共に周波数が変化する高調波ノイズが見られる。単体試験時においても見られず、周波数も変化しているので、電氣的ノイズとも考えられにくい。全観測時間帯で観測され、周波数の変化も一定なので、自然の波動とも考えにくい。高域混成周波数より上の領域を境にして観測されなくなるので、周囲のプラズマ環境によるアンテナとの相互作用のためにおこる現象ではないかと予想されるが、詳細はわかっていない。

### 3.4 デジタル技術の評価

ここでは、このロケット実験で初めて導入されたデジタル技術について評価を行う。今回導入されたデジタル技術は以下の通りである。

- DSP を用いたリアルタイムデータ圧縮 (VLF Direct E、VLF Memory E)
- PDC を用いた高速デジタル周波数掃引受信機 (HF)
- SH3 CPU による受信機全体の制御

#### 3.4.1 データ処理技術

先に述べているように、VLF Direct E、VLF Memory E データはサブバンド分割を用いたデータ圧縮を施し地上へデータを伝送する。特に VLF Direct E はリアルタイムでこれを行う。サブバンド分割法とは、観測した波形を 1,024 点ずつ用いていくつかの周波数帯に分割し (PWA では 8 つ)、それぞれ分割した波形においての最大ピーク値に最大ビット (PWA では 6bit) を割り当てて波形情報を表示することで、少ないビット数で波形情報を表すことができる手法である [7]。

地上に伝送されてくる圧縮データには、地上への伝送の際に抜け落ちた時、後の解凍に影響がないように、抜け落ちた部分がわかる情報を付加している。圧

縮率は観測データにより変動するため、観測途中での圧縮率悪化により地上へのデータ伝送が間に合わなくなることも考えられ、その対策も施されたが、実際の観測ではデータの抜け落ちは全くなく、良好な観測が行われた。

VLF Direct E では、地上で受信した総データ量が約 11.88MB で、実際の波形点数と A/D コンバータのビット数から計算したデータ量は約 50.37MB であった。これから圧縮率を計算すると、23.59%であり、ほぼ予定通りであった。また同様に VLF Memory E の Y1 成分は、圧縮データ量 3.80MB、元データ量 15.46MB で圧縮率 24.54%、Y2 成分は圧縮データ量 3.77MB、元データ量 15.46MB で圧縮率 24.37%でこちらも予定通りの観測であった。

PDCを用いた高速ディジタル周波数掃引スペクトル受信機である HF も先に述べたように良好に動作した。PDCによってダウンコンバートされた波形データを DSP により高速フーリエ変換してスペクトル情報を得ている。HF のデータ取得は、VLF Direct E 観測時は VLF Direct E の圧縮データの地上伝送時間と、観測時間とに同期している。したがって、掃引時間は VLF Direct E の実際の処理時間によって多少の変化があり、実際の打ち上げ時に観測された 1 掃引の周期は 455~490ms であった。また VLF Memory E 地上伝送時は上記とは違い、VLF Memory E の圧縮処理時間を加算した値と、地上伝送に必要な時間とに依存しており、1 掃引周期は 369~515 ms であった。設計段階では掃引時間は 600ms とされており、いずれもそれよりも高時間分解能の観測が行われた。

#### 3.4.2 SH3 CPU による受信機の制御

SH3 CPU による受信機全体のディジタル制御は概ね良好に動作したが、いくつかのディジタル技術導入にともなう問題も発生したので、将来の惑星ミッションのためにも問題の検討を行う。

**1)VLF Memory E Y1 と Y2 の同期の問題** 今回解析を進めていくと、Y1 成分と Y2 成分のサンプリングのタイミングが 2 サンプル分のずれがあることがわかった。したがって、前節の Y1 成分と Y2 成分の差動は、2 サンプル分ずらして差動をとっている。

VLF Memory E は先にのべたようにモノポールアンテナを二つ用い、機上で差動をとらず、2 成分のデータを地上へ送る仕様となっている。2 成分のデータを用い、インターフェロメトリ受信機として波数ベクトルを求めたり、差動をとり X 成分のデータと合わせて偏波を求めたりするために、両成分のサンプリ

ング点が同期してなければならない。そのため本機の仕様では、両成分のサンプルホールド回路は同一のタイミングで処理が行われるようになっている。同一のタイミングでサンプリングが行われた後は、A/D 変換器でデジタル変換され、1つの FIFO に格納される。

VLF Memory E の観測の開始時点においては、ロケット本体から送られてくるタイマ信号を利用し、CPU に割込み信号が印加されるような回路構成になっているが、“VLF Memory E Write Start”の割込み信号が印加された場合、その時間を記憶し VLF Memory E 用の FIFO をリセットし観測を始める。FIFO に格納されたデジタルデータは、先頭に Y1 成分か Y2 成分のデータか識別できるような情報が付加され、CPU は前から順番に処理していく。

2 サンプル分のずれは、ソフトウェアによる処理部分には原因が見つけられない。そのため、ハードウェアからソフトウェアへのインターフェース部分、すなわち FIFO の周辺で何らかの問題が発生したのではないかと予想される。おそらく、観測開始時の FIFO リセット後の一番先頭になんらかの原因で不当なデータが格納されてしまい、それを CPU が観測データと認識してしまい、その後のデータがずれてしまっていることが考えられる。しかし、これらのデータは非可逆の圧縮処理を施され地上へ送信されているので、このことを確かめることは出来ない。

同期の問題は解析のためには非常に重要であり、今後このようなことを避けるためになんらかの対策を施す必要がある。まず、打ち上げ前に同期のチェックを行い今回のような欠陥を直す事が必要である。また、地上やまた機上での CPU でずれが判断できるよう、データの順番に関する情報も付加するのも有効である。今回は幸いにも、地上の解析によりこのようなずれが判明されたので解析に支障はなかった。

**2)VLF Direct と VLF Memory の同期の問題** 偏波を求める為には、X 成分の観測である VLF Direct E と Y 成分の VLF Memory E の処理も同一のタイミングで行われなければならない、本 PWA もそのような仕様となっている。

しかし、地上での解析において、VLF Memory E と VLF Direct E の観測時刻を正確に合わせる事ができないという問題が生じた。今回、サンプル点数にして 1048 点分の時間のずれがあるのではと推定される。

原因の 1 つは、観測開始時間が不正確であることがあげられる。各データ点の観測時刻は、観測開始時刻を記録し、サンプリング周波数とデータ点数から



計算する。しかしながら前節で述べた仕様により、VLF Direct E の観測開始時刻と VLF Memory E の観測開始時刻が異なり、今回はこの記録した観測時刻の不精度のため、時間的にずれが生じると考えられる。

”WANT Stop”の割込み信号が印加された時 VLF Direct E の観測が開始され、”VLF Memory E Write Start”の割込み信号が印加された時、VLF Memory E の観測開始でそれぞれ FIFO がリセットされる。観測開始時間の記録はロケット本体から送られてくる同期信号により行われる。これは 2.56msec 毎に送られてくるパルス信号でこれをカウントアップしていくことにより、観測時間を同期させる。VLF Direct E 観測開始時における手順は、割込み信号が印加されると、DSP に FIFO のリセットの要求を出す。DSP 側では、FIFO リセットの要求を受け取ると現在行われている処理の終了を待って、FIFO をリセットし CPU に FIFO リセット完了を知らせる。CPU では、このリセット要求と完了の時間を計測しているため、正確なリセット時間がわからなく、またリセットのタイミングも同期信号に同期してないため、2.56msec 程度の不正確さが存在し観測開始時間が正確ではない。これらから考えられる誤差は約 $\pm 8$ msec である。

しかしながら約 1048 点のずれは、上記の理由だけでは説明することができなく原因は未だ不明であり、いずれも正確に求めることができず、現在のところ偏波解析を行うことができない。

この問題の原因はソフトウェア制御に起因するものであると考えられ、今後の設計開発にあたっては細心の注意が必要である。対策としては、まず観測開始は必ず同期信号に正確に同期するよう行なわれるべきである。また今回のように観測時間が異なる場合は、同時観測開始時、すなわち VLF Memory E 観測開始時に、同期させる事が必要である。今回のシステムでは、VLF Memory E 観測開始時に VLF Direct E の FIFO も同時にリセットさせ同期をとる事が必要である。

以上の様な同期の問題はあったが、今回のデジタル制御型受信機は、CPU による制御、DSP によるデジタル処理、メモリ蓄積など良好に動作し、将来のプラズマ波動受信機の大きな土台になるものである。

### 3.5 インターフェロメトリ受信機

本節では、この本ロケット実験 PWA に搭載された波形捕捉受信機の応用観測技術の一つであるインターフェロメトリ受信機について考察する。3.1節で述

べた受信機のうち、VLF Memory Eがインターフェロメトリ型の受信機である。VLF Direct Eは2つのWANTの出力を機上で差動を取り、一つのダイポールアンテナとして観測を行うが、このVLF Memory Eは2つのWANTの出力を機上で差動を取らず、それぞれモノポールアンテナとして使用する。この得られた2チャンネルの波形データを地上で相互相関解析を行い、波動の波数ベクトルを推定する。

得られた2種のデータを、3.2節に従ってそれぞれデータ較正を行い、アンテナ誘起電圧になおし、両者の波形の相互相関関数を取る。平面波がある時間差をもって、二つのアンテナに到着する場合、相互相関関数の相関の強いところが $\tau = 0$ からずれて観測される。今、静電波を仮定すると、ロケット自体がスピンすることにより、相互相関のピークのタイムラグが最も大きいところが波動の波数ベクトルとアンテナの向きが平行になったときであるので、このことから伝播方向と位相速度が推定可能となる。この時のタイムラグを $\tau[\text{sec}]$ 、ロケットの二つのアンテナの経路差を $l[\text{m}]$ とすると、位相速度 $v_\phi$ は

$$v_\phi = \frac{l}{\tau} \quad (3.5)$$

と推定することができる。

まず高周波領域において観測されているオーロラヒスと呼ばれる波動において解析を行った。このオーロラヒスはホイッスラーモードの波動であることが知られており、波長は本PWAのアンテナ長に比べ十分長いことが予想できるため、どのような波数ベクトルをもつ波動でであっても両者のタイムラグはほとんどないと予想される。したがってインターフェロメトリ受信機の動作を確かめる為に都合が良い。

図3.19に相互相関を適用した結果を示す。グラフの縦軸が打ち上げからの時間で縦軸が相互相関関数のタイムラグを表す。コンター図の色で相関の強さをあらわしており、赤色が相関の強いところで、青色が逆相関が強いところである。この図から、相関の最も強いところは常に $\tau = 0$ 付近であることがわかる。したがって、両者のアンテナ間で位相のずれが存在しなく、インターフェロメトリ受信機として、良好に動作していることがいえる。

今回のプラズマ波動観測ではいくつか興味深い波動が観測されているので、それらの波動の一つについて同様の解析を行う。図3.20において、上図は打ち

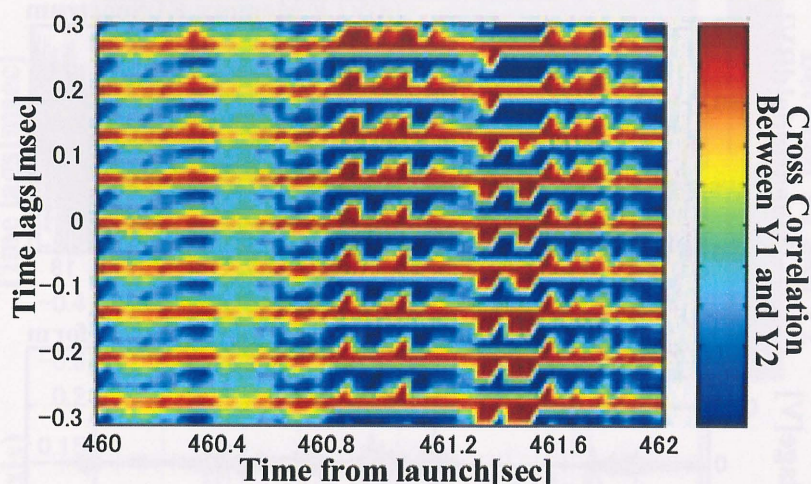


図 3.19: オーロラヒスにおける WANT Y1、Y2 成分の相互相関関数

上げ後 461 秒後から 462 秒後までの波形データを示し、下図がその得られた波動を FFT 処理をしてスペクトル表示したものである。この図において、高周波側で強く観測されている波動は先のヒスであり、このヒスの低域遮断周波数は、低域混成周波数で与えられる。この低域混成周波数の下の周波数領域の 3kHz 付近で強く観測された波動が存在し、今回、この波動について解析を行った。

この 3kHz 付近の波動について相互相関関数を計算してみると図 3.21 の上段図のようになる。この図の軸、色は図 3.19 と同様である。打ち上げ後 461.5 秒付近で相関が最も強い時のタイムラグが最大となっている (左側の点線)。この周波数帯には、残念ながら磁場センサーのデータはなく、この波動の磁場成分の有無をデータから確認することはできない。しかし、この波動の周波数  $f_w$  は  $f_{ci} < f_w < f_{LHR}$  であり、また詳細な解析からスペクトルが高調波構造を持つことがわかっているので、イオンサイクロトロン高調波と考えられる。従って、この波動が磁場に垂直に伝播する静電波と仮定すると、この時、波動の波数ベクトルがロケットの WANT Y 成分と平行であるといえる。この時のタイムラグは、7sample 分であり、約 0.16msec に相当するので、両アンテナの経路差 5m として、式 (3.5) より位相速度は約 32km/s と推定することができる。

上記のような議論が成り立つためにはこの波動が磁場に垂直な静電的な波動成分を含む必要がある。図 3.21 の中段図に VLF Direct E で観測した WANT X 成分のこの周波数帯における振幅の時間変移を示したもので、下段図に磁場観



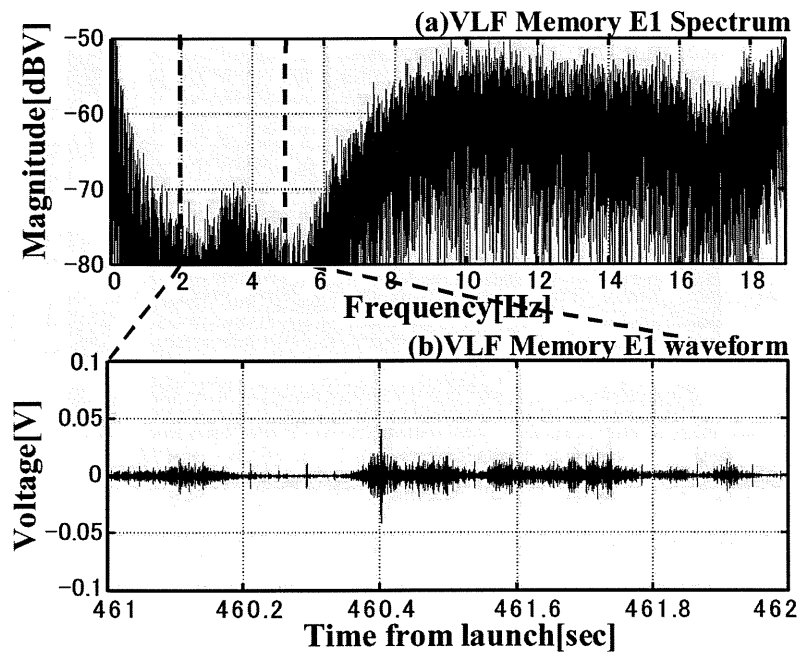


図 3.20: 3kHz~4kHz の波動 (a) スペクトル (b) 波形

測機 (MGF) の観測データから計算した、MGF センサのロケットのスピン平面内における磁場に対する角度の時間変移を表した。横軸は 3つの図とも合致するようにしてある。

これをみると、インターフェロメトリ受信機で観測したもっともタイムラグが大きくなる時刻、すなわち、Y成分を観測する WANT と波動の波数ベクトルが平行となると推定できる時刻から、ロケットが 90 度スピンした時刻に、WANT X成分の振幅が最も大きくなることがわかる (点線右側)。X成分を観測する WANT と波動の波数ベクトルが平行となっている時に強度が強くなっていることから磁場と垂直成分をもった静電波であると考えられる。従って、上記のような位相速度推定が可能である。

本ロケット実験では、このような波動がスピン周期程度の長時間観測される例が上記の例以外なかったため、この波動に関する十分な解析ができなかった。これは今回 Y成分のみインターフェロメトリ受信機として搭載し、X成分はダイポールアンテナとして観測したためである。観測された波動に対して連続的に位相速度を推定するためには同時観測する地点を増やす必要がある。これまで、本 PWA の VLF Direct E の様に機上で差動を取りダイポールアンテナと

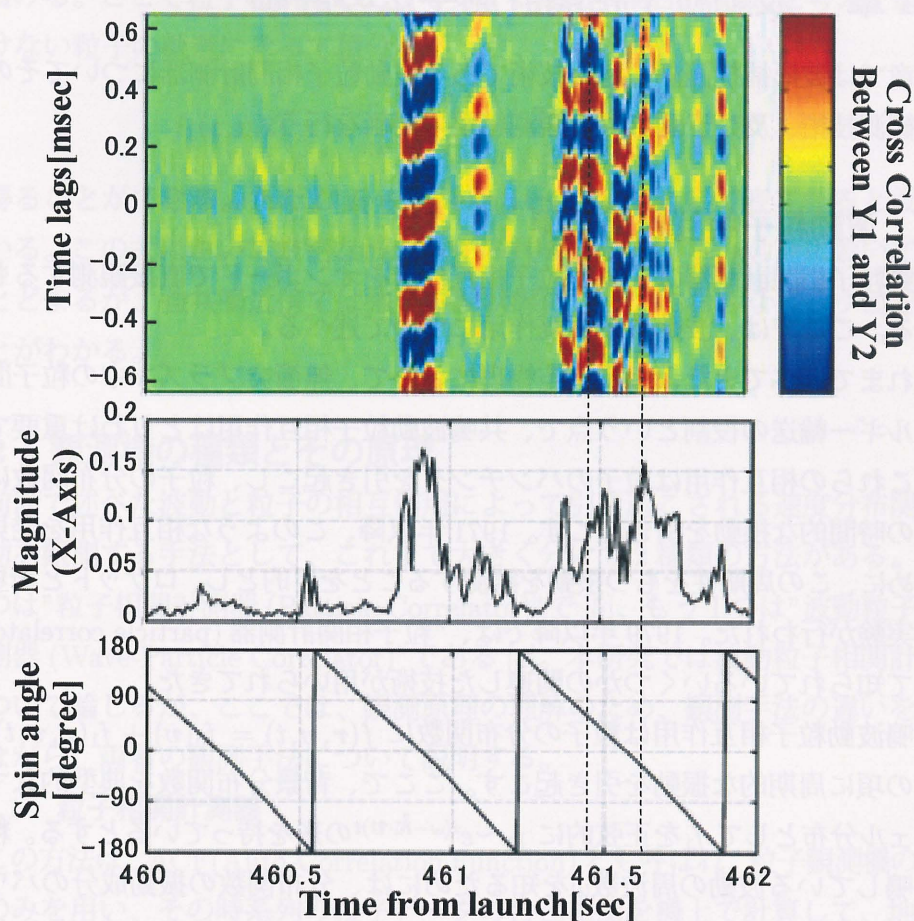


図 3.21: 3kHz~4kHz 波動における伝播解析 (a)WANT Y1 成分と Y2 成分の相互相関 (b)WANT X 成分の 3kHz~4kHz の受信強度 (c)MGF センサのスピン平面内での磁場に対する角度

して観測が多くなされてきたのは、差動を取るによりコモンモードノイズを除去するため、今回の VLF Memory E の観測においてもこのようなノイズによる大幅なダイナミックレンジの減少が心配された。今回の観測では、低周波領域でコモンモードノイズが見られるが、本節で解析したような周波数帯では大幅なダイナミックレンジのコモンモードノイズによる損失は見られなく、観測は良好に行われたといえる。しかしインターフェロメトリ受信機を考えるにあたっては、コモンモードノイズは十分考慮すべき問題である。

## 第4章 波動粒子相関計測手法の評価

本章では波形捕捉観測の応用技術である波動粒子相関計測器についてその原理、観測技術、及び予測される観測結果の評価を行う。

### 4.1 波動粒子相互作用観測

波動粒子相関計測器は、波動粒子相互作用をオンボードで直接観測するものである。ここでは、波動粒子相互作用について述べる。

これまで述べてきたように宇宙物理において、無衝突プラズマ中の粒子間のエネルギー輸送の役割という点で、共鳴波動粒子相互作用はとりわけ重要である。これらの相互作用は粒子のバンチングを引き起こし、粒子の分布関数に周期性の時間的な摂動を引き起こす。1971年以降、このような相互作用を発見するために、この周期性をもつ摂動を観測することを目的とし、ロケットと衛星による実験が行われた。1979年以降では、“粒子相関計測器 (particle correlator)”として知られているいくつかの関連した技術が用いられてきた。

共鳴波動粒子相互作用は粒子の分布関数に  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = f_0(\mathbf{v}) + f_1(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  の一次の項に周期的な振動を引き起こす。ここで、背景分布関数を典型的なマクスウェル分布として  $f_1$  を正弦的に  $f_1 \sim e^{i(\omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v})t}$  の形を持っているとする。粒子と共鳴している波動の周波数  $\omega$  を知るためには、分布関数の振動成分のパワースペクトル  $|f_1(\mathbf{v}, \omega)|$  を求めればよい。これは与えられた粒子の速度  $\mathbf{v}$  に対する分布関数の摂動の大きさを示す。

波動粒子相関計測器は、外部磁場に平行伝播する静電波に対する相互作用を観測するものであり、これよりそのような波動に対する相互作用に関して線形理論を適用して分布関数の摂動を求める [2, 24]。次に示した一次元ブラソフ方程式を線形的に解き進める。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{q}{m} E \frac{\partial f}{\partial v} = 0 \quad (4.1)$$

ここで、 $f$  は粒子の速度分布関数、 $E$  は  $z$  方向に平行な電場であり一次の量と仮定する。 $v$  は  $z$  軸方向の粒子速度、 $q$  は粒子の持つ電荷、 $m$  は粒子の質量である。先に述べた様に、 $f = f_0 + f_1$  とすると式 (4.1) は

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + v \frac{\partial f_1}{\partial z} + \frac{q}{m} E \frac{df_0(v)}{dv} = 0 \quad (4.2)$$



と書ける。ここで粒子の軌道にそって受ける変化の割合  $df_1/dt$  を考え、摂動を受けない粒子の軌道にそって積分を行うと、

$$f_1(z, v, t) = \frac{-iqE_1}{m} \frac{df_0(v)}{dv} \frac{1 - e^{i(\omega_p^2 - kvz)}}{\omega - kv} e^{ikz - i\omega t} \quad (4.3)$$

を得ることができる。ただし  $E = E_1 \exp(ikz - i\omega t)$  として表されると仮定している。この式において厳密な波と粒子の共鳴は  $\omega - kv = 0$  の点において有限にとどまるが、強共鳴近傍では強い振動状態になり、おおきなピーク値を示すことがわかる。

## 4.2 観測機の種類とその原理

前節で述べた波動と粒子の相互作用によって引き起こされる速度分布関数の振動を観測する手法として、これまで大きく分けて2種類の方法がある。まず1つは”粒子相関計測器 (Particle Correlator)”で [5]、もう1つは”波動粒子相関計測器 (Wave-Particle Correlator)”である [3]。本研究では波動粒子相関計測器について論じるが、ここでは、観測原理の理解のため、観測手法の違いを考慮しながら、両者の観測手法について説明する。

### 4.2.1 粒子相関計測器

この方法は、ACF(Auto-Correlation Function)とも呼ばれ、粒子観測機のデータのみを用い、その時系列の粒子データの自己相関を機上で計算して、地上へ送信し分布関数のパワースペクトルを求めることにより粒子のバンチングを発見する方法である。これまでいくつかの衛星やロケットに採用された手法である。自己相関関数の求め方によりいくつかの手法がある。

- Muti-bit ACF

通常、粒子観測機はあるエネルギーの1ステップの掃引時間内での粒子の和を出力とするが、これはその時間内をまたいくつかの期間に分け、その連続した時系列のデータに関して自己相関を計算し地上へ伝送する方法である。したがって、出力データとしては、タイムラグとエネルギーレベルの2次元データである。統計的な正確性がえられないため、通常数エネルギー掃引分にわたるデータが足されて解析される。したがって、この方法は比較的長く続く波動粒子相互作用現象の観測に限られる。

- One-bit ACF

処理の簡単化のため、自己相関関数の計算をする前に、各サンプルデータ

をカウントの平均と比較して 1bit に変換する方法である。

- **Buncher**

オーロラ領域などでの電子ビームとの相互作用を観測する場合、電子のプラズマ周波数は非常に大きいものとなり、粒子機のカウントレートよりもずっと高くなる。このような場合に有効である手法が Buncher である。これは粒子イベント間の時間をカウントレートより高い周波数を持つクロックで測定し、その時間のヒストグラムを作成するものである。粒子機のカウントレートが低い場合、この Buncher は前述の One-bit ACF と同等な働きをする。

以上のような手法が採用された海外の観測ミッションを表 4.1 に示す。

表 4.1: ACF 搭載ミッション

Rockets:	Techniques	Science Objectives	Dates
AUN	Buncher	artificial beam	Nov 78
E2B	Buncher	auroral arc	Dec 81
CAESAR	ACF+Buncher	auroral arc	Jan 85
PULSAUR	ACF+Buncher	pulsating aurora/arc	Feb 94
OEDIPUS-C	ACF+Buncher	arcive HF transmission / auroral arc	NOv 95
Satellites:	Techniques	Science Objectives	Dates
AMPTE-UKS	ACF+FFT	magnetosphere / active ion release	Aug 84
CRRES(LEPA)	ACF+CCF	magnetosphere	July 90
STS-46(SPREE)	ACF+Buncher	TSS-1 artificial electron beam	July 92
Cluster(DWP)	ACF	magnetosphere	t.b.d.
STS-75(SPREE)	ACF+Buncher	TSS-1R artificial electron beam	1996

#### 4.2.2 波動粒子相関計測器

この方法は上記の粒子相関計測器とは違い、波形データと粒子データを用い、直接波動と粒子の相互相関を機上で計算し粒子のバンチングを検出する。この波動粒子相関計測器の大きな特徴は、波形データと粒子データを直接相関を取ることであり、そのため、粒子の分布関数の摂動の大きさ、波形との位相差を得ることができ、波動と粒子の相互作用に関してより多くの情報を得ることが

できる。

波動粒子相関計測器の第一の目的は、共鳴粒子のエネルギー、分布関数の振幅、波動に対する位相を求めることである。ここでは、WIND 衛星や FAST 衛星に搭載された波動粒子相関計測器の原理、設計を紹介する。

もし仮に電界波形が既知とし  $E = E_0 \sin(kz - \omega t)$ 、粒子分布関数の振動成分  $f_1$  を正弦的な振動とすると、 $f_1(v, \theta)$  は次のように求めることができる。

$$\frac{f_1}{f_0} = \frac{\sqrt{2}}{t_{\text{int}}} \frac{\int E_0 \sin(kz - \omega t + \theta) f dt}{\langle E^2 \rangle_t^{1/2} \langle f \rangle_t} \quad (4.4)$$

ただし、 $t_{\text{int}}$  は積分時間をあらわす。したがって、ここで  $f_1(v, \theta)$  は、ある速度における波動との位相差が  $\theta$  である分布関数の摂動の振幅をあらわす。これまでの多くのミッションでは機上で  $\theta = 0, \pi/2$  の時のみ計算している。これは  $\theta = 0$  の時は電界波形と位相が一致していることをあらわし、 $\theta = \pi/2$  の時は波動のポテンシャルと位相が一致していることをあらわし、それぞれ SIN CORRELATION、COS CORRELATION と呼ばれる。

これまでの実際の機器では、回路の簡単化のため、波形は機上で 2 値化したのち相関がとられていた。従って式 (4.4) の  $E = E_0 \sin(kx - \omega t)$  は  $\text{sign}(E)$  として計算され、ある期間における波形の極性が正の時の粒子のカウント値を  $C_{\text{pos}}$ 、波形の極性が負の時の粒子のカウント値を  $C_{\text{neg}}$ 、粒子の総カウント数を  $C_{\text{total}}$  とすると、式 (4.4) は

$$\frac{f_1}{f_0} = \frac{\pi}{4} \frac{C_{\text{pos}} - C_{\text{neg}}}{C_{\text{total}}} \quad (4.5)$$

で求める事ができる。係数  $\pi/4$  は波形を 2 値化する際の補正である。振動が正弦的の仮定のもとで、粒子の分布関数の振動の振幅、位相はそれぞれ

$$\frac{f_1}{f_0} = \sqrt{C_{\text{sin}}^2 + C_{\text{cos}}^2} \quad (4.6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{C_{\text{cos}}}{C_{\text{sin}}} \quad (4.7)$$

で求めることができる。ここで  $C_{\text{sin}}$ 、 $C_{\text{cos}}$  はそれぞれ SIN CORRELATION、COS CORRELATION をあらわす。

WIND 衛星及び FAST 衛星で採用された波動粒子相関計測器のブロック図を図 4.1 に示す。まずアンテナで受信された波形データは、適当なフィルタを

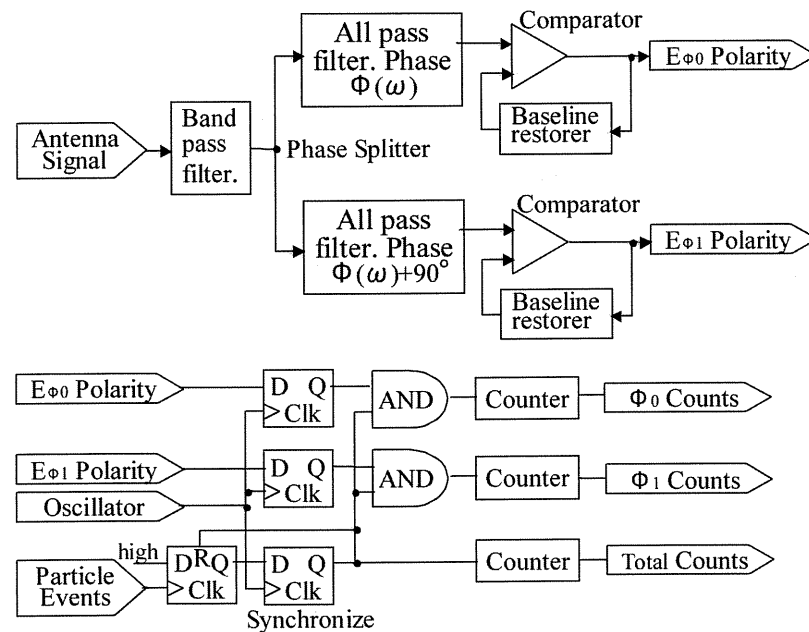


図 4.1: FAST 衛星搭載波動粒子相関計測器ブロック図

通り、アナログフェイズスプリッターに入力される。ここでは、互いに位相が 90 度異なる波形が出力される。この二つのデータは次にコンパレータで波形の極性が正の時は high、負の時は low に 2 値化される。図中の baseliner restorer は 2 値化された波形のデューティー比を 50% に保つためのものである。デューティー比が 50% からはずれると誤差が生じる。

粒子のイベントが発生した時に、波形の極性が正の時にインクリメントされるようなロジック回路が設計されたカウンター 2 種類、および、総カウント数を計測するカウンターが設けられており、このカウンター回路が各エネルギーレンジ毎に設けてある。したがって出力としては、お互い位相が 90 度ずれた波形の極性が正であるときの粒子のカウント値である、 $C_{\text{pos}}$  と粒子の全カウント値  $C_{\text{total}}$  の全部で 3 つのカウント値が得られるようになっている。 $C_{\text{pos}} - C_{\text{neg}}$  は従って、 $2C_{\text{pos}} - C_{\text{total}}$  で得られる。

### 4.3 シミュレーションを用いた検討

#### 4.3.1 シミュレーションの目的とモデル

前節で述べたように、海外の衛星観測では、波動粒子相関計測器が積極的に用いられるようになってきている。それに対し、我が国ではまったくその試み

がなされていないのが現状であり、それから得られる観測結果についても十分なモデル計算すらされていない。そこで本節では、計算機シミュレーションにより波動粒子相関計測器から期待される観測結果についての評価を行う。

シミュレーションを用いた検討の目的は、波動の成長・発展の各段階において、この波動粒子相関計測器の結果、すなわち、波動と粒子の分布関数の相関結果がどのような傾向を示すのが調べ、実際の観測の目安とするものであり、かつ新しい波動粒子相関計測器の開発の指標とするためである。この波動粒子相関計測器は磁場に平行伝播する静電波をターゲットとしているので、シミュレーションは本研究グループで開発された電磁粒子コード KEMPO(Kyoto university ElectroMagnetic Particle cOde) の一次元モデル KEMPO1[19] を用いて行い、本研究では、電磁波を無視し静電波のみを取り扱う静電粒子シミュレーションを行う。この静電粒子シミュレーションではマクスウェル方程式を解かず、粒子のポアソンの方程式のみを解くことによって場を求める。シミュレーションモデルは一次元周期境界系とし、Bump-on-tail と呼ばれる電子速度分布 (図 4.2) を初期値として、Bump-on-tail 不安定性により平行伝搬ラングミュア波が励起されるようにする。この Bump-on-tail は温度の高い背景電子と弱い電子ビームから構成される電子速度分布配置でこの分布配置から引き起こされる不安定性からランダウ逆減衰、あるいはランダウ成長と呼ばれる波動の線形成長が起こる。さらにその非線形発展から BGK モードのポテンシャルが生じることが本研究グループの計算機実験により発見され、地球磁気圏の PSBL(Plasma Sheet Boundary Layer) において多く観測されている BEN の構成要素の一つである ESW の発生メカニズムであると考えられているものである [18]。したがって、それらの各段階で波動と粒子速度分布との相関を取ることで、波動の成長・発展における各段階の、波動粒子相関計測器の傾向を考察するのに適当である。

波動と電子速度分布との相関は、ある地点における時間系列データで行う。これまで行われてきた波動粒子相関計測器と同じように、観測された電界波形と電子速度分布と相関をとる SIN CORRELATION と、電界波形から 90 度位相をずらして速度分布との相関をとる COS CORRELATION を計算する。今回のシミュレーションでの相関は式 (4.4) の分母の  $t_{\text{int}} \cdot \langle f \rangle_t$  を  $(t_{\text{int}} \cdot \langle f \rangle_t)^{1/2}$  にして計算している。これは、粒子数が少ない速度領域での分布関数の振動が大きく検出されてしまうのを考慮して、総カウント数で重みをつけるためである。



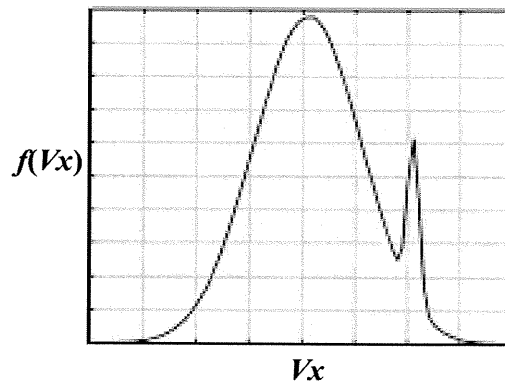


図 4.2: bump-on-tail 電子配置

#### 4.3.2 シミュレーション結果

最初に行ったシミュレーションによる電子速度分布、電界波形、電界波形がもつ静電エネルギーのある地点における時間発展を図 4.3 に示す。すべて横軸はタイムステップであり、電子速度分布図の縦軸は電子ビームのドリフト速度で規格した  $x$  成分の速度を示す。電子ビームによる電子速度分布関数中の  $\frac{df}{dv} > 0$  の正の傾きの領域により、ランダウ成長がおこり、ラングミュア波が励起される。この段階では、波動のもつエネルギーをみてわかるように線形的に成長する。しばらく時間が経過すると、非線形の効果が強くなり、波動の成長は飽和する。このシミュレーション結果に関し、SIN CORRELATION と COS CORRELATION を計算したものを図 4.4 に示す。上段に SIN CORRELATION、下段に COS CORRELATION を示す。両者とも横軸がタイムステップ、縦軸が粒子の速度を電子ビームのドリフト速度で規格化したもので、コンターの赤色が波形信号と分布関数の相関が強いところ、青色が逆相関が強いところを示す。

これを見ると、まず波動が線形的に成長している領域で SIN CORRELATION の正の相関が強くなっている領域が存在する。そして、波が成長段階から飽和に向うにつれ、SIN CORRELATION が弱まり、COS CORRELATION が強くなり、と同時に COS CORRELATION の負の相関が強い領域が速度方向に拡大していき、飽和した後はこの関係を保つことが見てとれる。

タイムステップが 2000 近辺の SIN CORRELATION を抜き出したものとその時間での電子速度分布の和を図 4.5 に示した。速度分布から傾きが正の部分が見てとれ、その領域で SIN CORRELATION が正になることがわかる。また、速度空間でその両側の領域では SIN CORRELATION が負の領域が存在する。

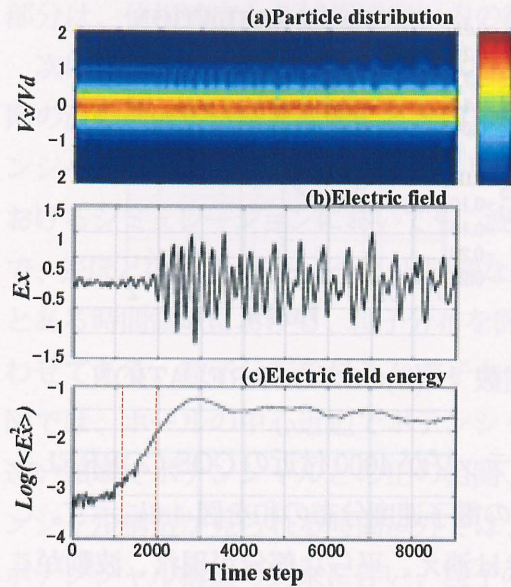


図 4.3: シミュレーション結果 (a) 電子分布 (b) 電界波形 (c) 静電エネルギー

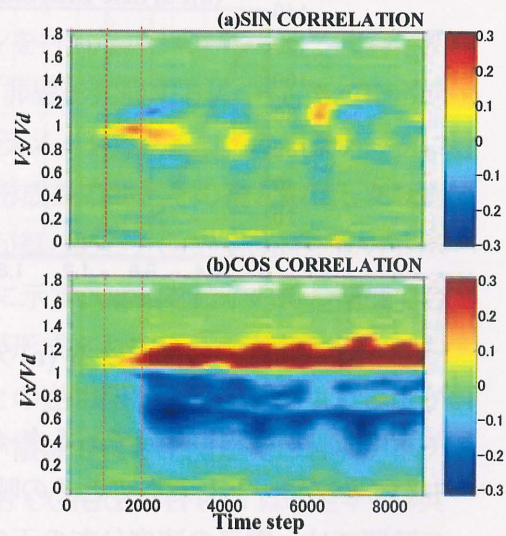


図 4.4: 相関結果 (a) SIN CORRELATION (b) COS CORRELATION

この領域では電子の速度分布は負の傾きをもっていることがわかる。したがって、ランダウ減衰・成長の物理を考えると、波動が粒子からエネルギーを受け取る領域では、電界波形と電子速度粒子分布で正の相関が強くなり、逆に波動がエネルギーを失い粒子に与える場合は、負の相関を示すといえる。また、SIN CORRELATION は電子ビームのドリフト速度よりわずかに小さい部分、すなわち励起された波動の位相速度近辺でピークをとることがわかり、これは、前々節のブラゾフ方程式から導いた結果に一致する。

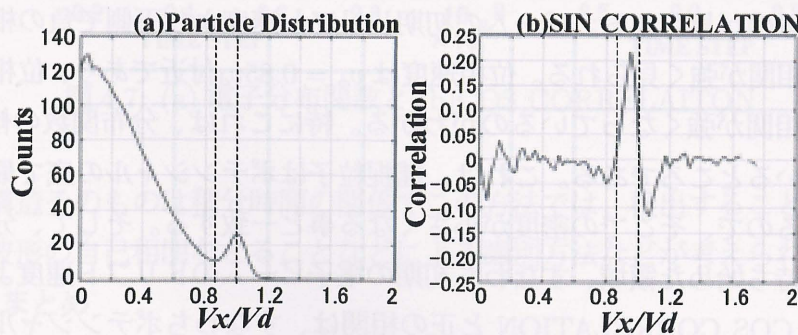


図 4.5: (a) 分布関数 (b) SIN CORRELATION

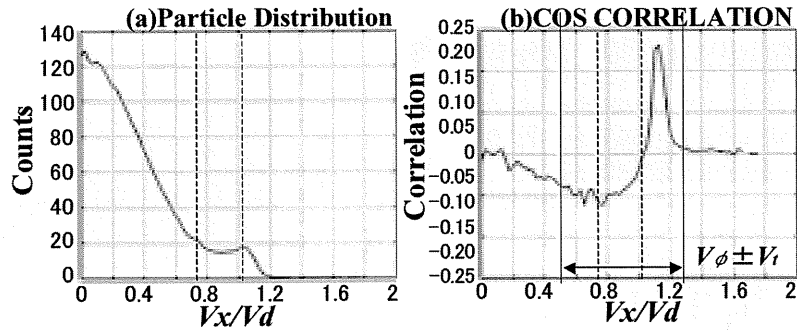


図 4.6: 同時刻における (a) 分布関数 と (b) COS CORRELATION

次に波動が飽和した後であるタイムステップが 4000 付近の COS CORRELATION をプロットしたものとその時間での電子速度分布の和を図 4.6 に示す。この時間では、電子の速度分布の正の傾きは消え、平らな部分が現れ、波動がこれ以上成長しなくなっている。この時、捕捉、非捕捉の非線形な粒子と波動の相互作用が考えられる。波動が飽和したときの粒子の捕捉速度は、

$$v_{\text{trap}} = 2\sqrt{\frac{eE}{km}} \quad (4.8)$$

で求められ、電子の持つ速度を  $v$ 、波動の位相速度を  $v_\phi$  とすると、

$$v_\phi - v_{\text{trap}} < v < v_\phi + v_{\text{trap}} \quad (4.9)$$

の範囲内にある電子が波動のつくるポテンシャルに捕捉されていると考えることができる。ただし、 $e$ 、 $E$ 、 $k$ 、 $m$  はそれぞれ電子の持つ電荷量、電界波形の振幅、波数、電子の質量である。この範囲で COS CORRELATION の相関が強く出ているのが見られる。ビームの初期ドリフト速度より下側で負の相関、上側で正の相関が強く見られる。位相速度は  $v_\phi = 0.85v_d$  付近であり、位相速度近辺で負の相関が強くなっているのがわかる。特にこれは、分布関数の傾きが 0 になっているところである。これは、捕捉粒子はポテンシャルの底で最も加速されているので、そこでの密度が小さくなる事と一致する。そして、分布関数が傾きを持ち始めた領域、すなわち初期の電子ビームのドリフト速度より速い領域での COS CORRELATION と正の相関は、すなわちポテンシャルと正の相関を示す。また速度が低い領域での分布関数の傾きが 0 でないところで、さらにポテンシャルとの負の相関を持つようになる。いずれも強く相関が現れる



部分は、位相速度から捕捉速度以内の範囲である。

次に、パラメータを変えてシミュレーションを行った。このパラメータでは、初期の波動の成長段階では先ほどと同じだが、非線形発展するにつれ、BGK ポテンシャルが形成され、波が孤立するようなパラメータである。このパラメータにおけるシミュレーションにおいても、波の線形成長の間とその後と飽和した状態で、先ほどのシミュレーションと同様な結果が得られた。COS CORRELATION とある時間領域における、粒子分布を図 4.7 に示す。縦軸を粒子の持つ速度で合わせてある。粒子分布を見ると電子ホールが形成されているのがわかる。この図では、ホールの中心近辺でポテンシャルとの逆相関が強く、それより速度が速い領域でポテンシャルとの正の相関、遅い領域で負の相関が見られる。ポテンシャル構造が見られる時間以外では、COS CORRELATION は小さいため、ポテンシャル構造の到来に伴い、粒子の密度変動がおこる事がわかる。これらから、ポテンシャル構造が孤立して波動がパルスになったときも、同じように位相速度から電子ホール内でポテンシャルと、同相または逆相で粒子の密度が変動することがわかる。

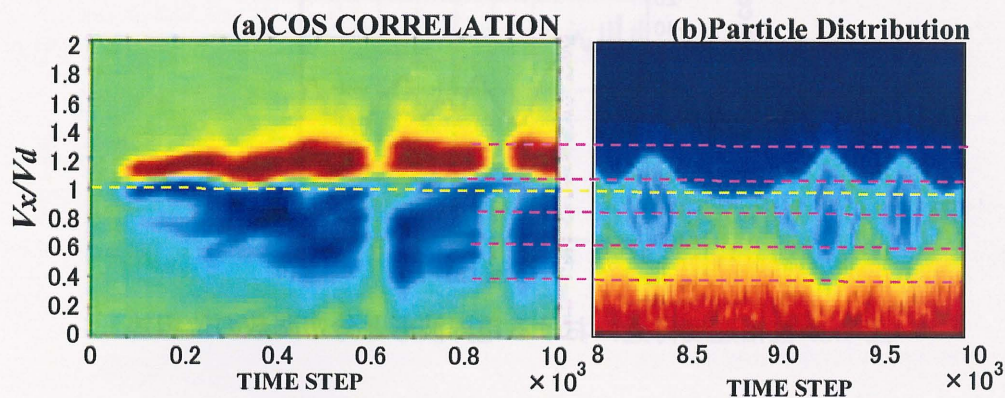


図 4.7: (a) 電子分布関数と (b) COS CORRELATION

孤立構造そのものは積分時間の関係でこの方法では、検出することはできないが、波形の自己相関をとることなどによる識別方法などが考えられる。

#### 4.3.3 まとめ

静電粒子コードを用いた一次元周期境界系のシミュレーションにより、それぞれの波動の発展において波動粒子相関計測器がどのような結果を出すか考察

してきた。まず波動が線形的に成長している段階では、電子ビームのドリフト速度より少し速度が低い部分で、SIN CORRELATION が正となる領域が存在し、その部分では分布関数の傾きが負である部分である。したがって、SIN CORRELATION の正、すなわち電界との正の相関がもっとも高いところを知る事により、粒子の共鳴速度、すなわち、波動の位相速度を知ることができる。またその時の分布関数の摂動の振幅を求めることにより、波動の成長率を推定することができる。線形発展段階が飽和し、非線形段階に移行していくにしたがって電界との相関が弱まり、ポテンシャルとの相関が強くなっていく。位相速度から粒子の捕捉速度以内の、特に位相速度付近でポテンシャルとの逆相関が強くなる。したがって、COS CORRELATION の結果により、波動の位相速度、及び、ポテンシャル構造の移動速度が推定することができる。電界波形と分布関数の振動の位相速度付近での位相差を、式 (4.7) より計算したものを図 4.8 に示す。線形段階から非線形段階に以降するにしたがって、電界波形との位相差が 90 度に漸近していくことがわかる。

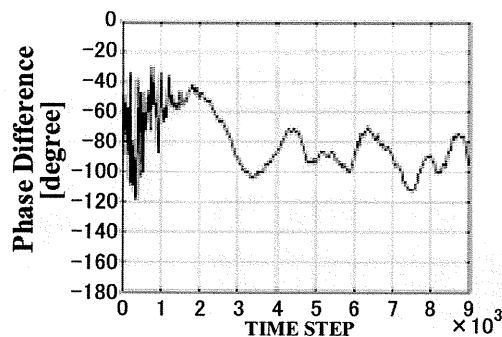


図 4.8: 位相速度付近における電界波形と分布関数の位相差

今回は、周期境界系で、初期条件で電子ビームは空間的に一様である場合でシミュレーションを行ったため、波動は空間的に一様で時間的に発展していき、その時の相関をとった。この時、線形段階から非線形段階までの発展の時間は短いため、数周期分しか積分時間が取れなかった。しかし、電子ビームをある点から注入するシミュレーションにおいて、不安定性は空間的に発展する事がわかっている [23]。したがって、衛星の移動速度はビームのドリフト速度よりも十分に遅いため、定点観測として考えることができ、電子ビームのソースが移動しないと仮定すると、衛星はある領域における特定の不安定性の発展段階を観



測していることになる。この波動粒子相関計測器によりその地点でどのような段階の波動が励起されているか推定することができ、後の解析において重要な情報を与えるといえる。またデータ判別などの指標としてこの波動粒子相関計測器のデータを用いる場合には、分布関数の振動の振幅、位相差などを用いることができる。振幅により、粒子との相互作用を起こしている波を判別し、さらに位相差でその波動の種類を類推し、必要な波形だけ地上へ送信するといった事も可能といえる。

## 第5章 波動粒子相関計測器のシステム設計検討

本章では、次期衛星観測ミッションに向けた波動粒子相関計測器の設計について検討する。

### 5.1 目的とするミッション

これまでの波動粒子相関計測器は主に、極域のオーロラ領域や太陽風中でのパケット状のラングミュア波をターゲットに行われてきた。今回の設計では、将来計画されている次期磁気圏尾部探査衛星を想定して行う。GEOTAIL 衛星やその衛星において、地球磁気圏尾部のプラズマシートなどで強いラングミュア波が観測されている。また ESW などの静電的な非線形プラズマ波などが観測されており、波動と粒子との相互作用が頻繁に起っているところで、高時間分解能での観測が非常に重要となる。こうした地域で、波動粒子相関計測器による観測は観測した地域でどのような波動の発展段階であるのか知るためにも有意義であると考ええる。さらに次期ミッションでは、複数編隊衛星になる可能性が高く、そこから発生する大量の観測データに見合ったデータ伝送容量は見込めず、全時間の高時間分解能データを地上へ送信することができない。したがってデータを選別して送り届けることが考えられている。そのデータ選別の指標として、この波動粒子相関計測器を用いることも可能であると考えられる。

現在、磁気圏尾部探査衛星の計画が進められているが、GEOTAIL 衛星と同じように、粒子観測器が搭載される。波動粒子相関計測器では、この粒子観測器から粒子のデータを波動観測機に送り波動との相関を取る。これらの領域でのプラズマ周波数は数 kHz 程度であり、電界波形受信機のサンプリング周波数は 30kHz 程度が考えられている。

### 5.2 粒子観測器の仕様

本節では、現在、宇宙科学研究所において開発構想段階である次期磁気圏尾部探査衛星の粒子観測器の仕様について述べる。最近の我が国における粒子観測器は、トロイダル・トップハット型静電分析器が主流となりつつあり、次期磁気圏尾部探査衛星においてもこれが採用される。このトロイダル・トップハット型静電分析器では、360 度の視野を持つ入射口からセンサー内に入った荷電粒子がトロイダル型の偏向電極に印加された電圧に応じてエネルギー選別され、

検出器である MCP(Micro Channel Plate) に入射する。MCP で増幅された荷電粒子は、MCP の背後にあるアノードで検出されるがこの際、粒子の入射方向はアノード上の粒子位置に応じてアノードから 2 つのパルス間の時間差を計測することによって決定される。図 5.1 にトロイダル・トップハット型静電分析器の概略図を示す。データとしては、入射方向を示す 8bit データが出力される。

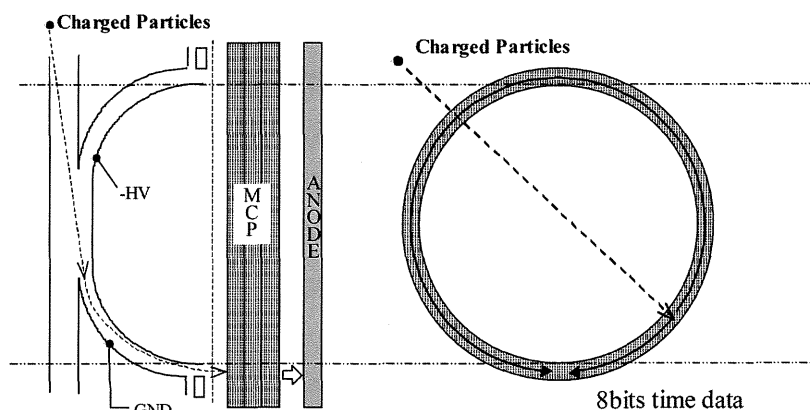


図 5.1: トロイダル・ハット型静電分析器

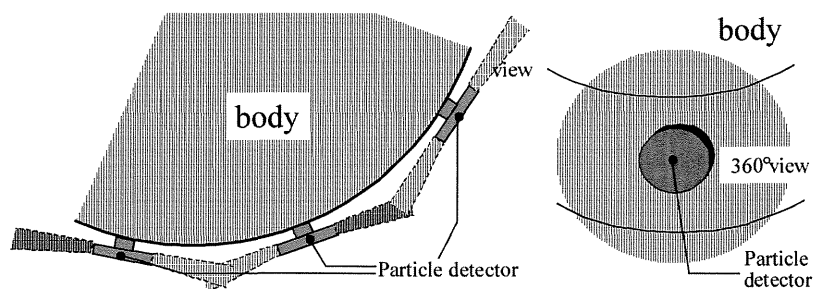


図 5.2: 衛星を上から見た粒子観測器の配置 (左図) と横から見たときの粒子観測器の視野 (右図)

エネルギーレンジは  $10\text{eV} \sim 40\text{keV}$  を 32 ステップに分割して掃引される。これまでの粒子観測器は複数のエネルギーステップを同時に観測する事がなかった。しかし次期磁気圏尾部探査衛星では、2~4 エネルギーステップを同時に観測し、時間分解能を向上させることが計画されている。1 エネルギーステップ

当りの掃引時間は 1msec が設定されており、したがって、2 ステップ同時に観測すると時間分解能は 16msec、4 ステップ同時観測であると 8msec となる。同時観測が行われる場合、粒子データには掃引エネルギー情報として 1bit~2bit 付加される。

データ転送ラインのパルス幅より、1 センサーあたり  $10^7/\text{sec}$  のカウントレートが最大値である。センサーの感度としては、1 サンプル当りのカウント数が GEOTAIL 衛星搭載の LEP(Low Energy Particle) の 1 サンプル当りのカウント数と同等のものが目指されている。GEOTAIL 衛星搭載の LEP の時間分解能は 12sec であり、1 エネルギーステップあたりの観測時間は約 20msec である。したがって、GEOTAIL の LEP に比べ約 20 倍程度の感度である。LEP におけるカウント数は、多いところで  $10^2 \sim 10^3/\text{sample}$  程度であり、同等のカウント数が 1msec で得られるとすると、 $10^5 \sim 10^6/\text{sec}$  のカウントが得られるものと考えられる。

衛星のスピンによる影響をなくすため、このセンサーが全部で 8 台搭載され 360 度の方位角方向が監視される。仰角方向はセンサーの 360 度の視野によりカバーされる。その概念図を図 5.2 に示す。

この粒子観測器は現在開発中のものであるので、仕様が変更される可能性もあるが、本研究での波動粒子相関計測器の設計検討は上記の仕様を想定して行う。

## 5.3 基本設計

### 5.3.1 粒子観測器からの粒子データ取得

可能ならば、衛星に並べられた 8 台すべてのセンサーのデータを扱うのが望ましいが、現時点では高速で動作する 8 台のセンサーからのデータストリームすべてを波動観測器で扱うのは難しい。したがって、衛星搭載の磁場観測装置からのデータを用いて外部磁場の方向を求め、外部磁場方向に最も平行な平面の視野を持つセンサーを選びそのデータを用いることにする。

前節で述べたように粒子観測器のセンサーに粒子観測器が入り込むと、その到来方向がプリアンプで計算され 8bit データとして出力される。この 8bit のデータとエネルギー情報とを合わせて、波動観測機がオンボードで粒子観測器から取得して利用する。粒子器のセンサーでの位置検出の計算には約  $1\mu\text{sec}$  必要である。しかし、今回ターゲットにする地球磁気圏尾部領域での電子のプラズマ周波数は高々数 kHz であるので、この計算時間による相関への影響はない

といえる。

### 5.3.2 一次元粒子分布関数を用いた相関

これまでの波動粒子相関計測器は、ある一定の方向から (主に磁場に平行方向) 到来する粒子のみを用いて計算を行っていた。しかし、粒子器のカウントレートの制限のため多くのデータが得られない。カウントレートが低いと統計的揺らぎのために、感度の高い波動粒子相互作用観測を行うためには、多くの積分時間を要することになる。例えば、これまでの設計仕様ではカウントレートが  $10^5/\text{sec}$  の時、1%の摂動を検出するためには最低 100msec の積分時間が必要となる。そこで、磁場に平行して到来する粒子のデータのみから 1 次元粒子分布関数を求めるのではなく、他から到来する粒子のデータも用い一次元粒子分布関数を求め、カウントをかせぐことを考えた。

得られる粒子データは、磁場を含む一つの平面内で到来する粒子に関するものであり、粒子観測器からは  $f(v, \theta)$  の 2 次元分布関数が得られる。ここで、 $\theta$  は 16 方向に分割される。 $\theta$  と磁場の方向からピッチアングル  $\psi$  を求め、さらに  $v$  と求めた  $\psi$  から  $f(v_{\parallel}, v_{\perp})$  の 2 次元分布関数を求める。このときに補間を行い、グリッド上の点に配置し直す。このとき、 $v_{\parallel}$  のグリッドは粒子観測器のエネルギーステップと同じにする。磁場に平行な 1 次元分布関数は次式で求められる。

$$f(v_{\parallel}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(v_{\parallel}, v_{\perp}) dv_{\perp} \quad (5.1)$$

前章のシミュレーションによる相関の計算は、もとよりこの分布関数で計算されている。実際には、これらは打ち上げ前に計算可能なので、オンボードのメモリにテーブルとして記憶しておく (付録 A.1 参照)。

GEOTAIL 衛星搭載の LEP における観測データを用い、ある一定方向からのみの粒子のカウントと、上記の計算により求められたものとの比較を行った。それを図 5.3 に示す。左図が観測されたカウント値で、実線が磁場に平行な方向を向いてるセンサーで得られたカウント値、点線が上記の計算によって求められた値である。これは、磁場に平行方向を向いているセンサーのカウント値に他の方向のセンサーのカウント値を先に述べた係数で重みをつけて足し合わせたものである。右図はこれらの比をとったものである。これらの結果は領域によって異なるが、だいたいカウントの多いエネルギーレンジで、2~4 倍の値が得られていることがわかる。



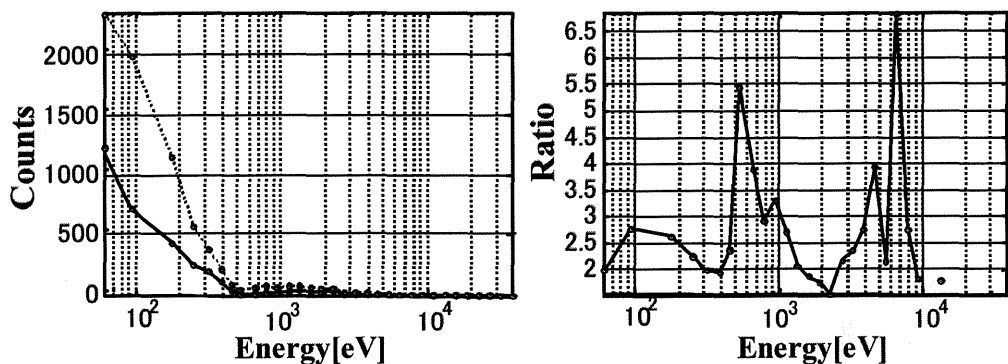


図 5.3: カウント値 (左図)。磁場平行方向を向いたセンサーのみのカウント値を実線で表し、すべてのセンサーを用いて計算したカウント値を破線で示した。右図にそれらの比を表す。

### 5.3.3 ソフトウェアによる計算

これまでの波動粒子相関計測器はハードウェアで実現されてきた。しかし今回の衛星では、複数のエネルギーステップが同時に観測されるため、設置するカウンターの個数が激増してしまう。また波動観測器や粒子観測器のモード切り替えなどにも対応できない。したがって柔軟な観測を目指しソフトウェアによる実現を考える。これにより、前項の計算のみならず、ピッチアングル毎の相関の計算や、粒子の自己相関の計算など多様の観測モードが実現でき、柔軟な観測が可能になる。また、粒子観測器の仕様変更などにも柔軟に対応できる。またこれにより波動データは、これまでの様に 2 値化したものではなく、その時の振幅を用いたものとなる。統計的な誤差がどれくらいであるか、計算機シミュレーションを用いて検討したところ、標準偏差が波形 2 値化時に比べ若干向上されたが、ほぼかわらないことがわかり、統計的な誤差は粒子の総カウント数  $T$  とすると  $\sqrt{T}$  で評価してよいといえる。

## 5.4 システム設計

これまで述べてきたような事をふまえた波動粒子計測器のブロック図を図 5.4 に示す。粒子観測器から来るデータは、入射角方向 8bit、エネルギー識別情報 2bit と想定する。これを時間情報を付加し直接メモリに書き込む事を考える。また波動のデータも直接メモリに書き込み、ある一定時間、メモリに波形データ、粒子データをためた後に、CPU または FPGA など相関計算等を行う。

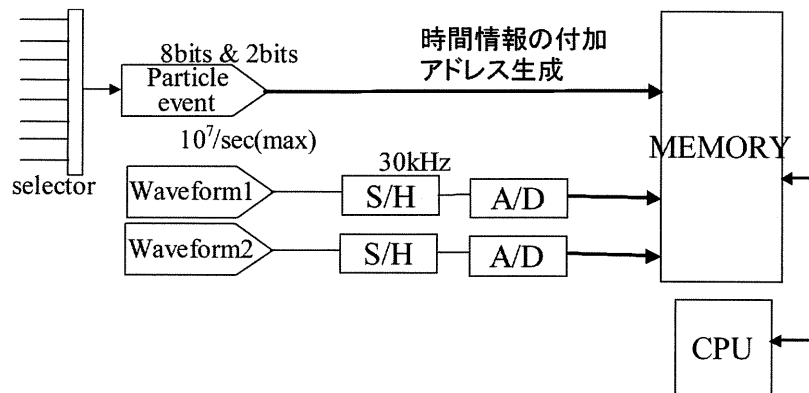


図 5.4: 波動粒子相関計測器の設計

粒子データの考えられる最大のカウントレートは  $10^7/\text{sec}$  である。しかし、これは瞬間のカウントレートの最大値であるので、実際に 1sec の間に検出されるデータは、GEOTAIL のデータから推定して多くても  $10^6$  個程度だと考えられる。仮に 1sec 間で  $10^6$  個の粒子が検出されたとし一つの粒子データを 2Byte とすると、5 分間で 600MByte のメモリが必要となる。したがって、メモリに蓄える時間と平行してできるだけ計算を行い、データ量を縮小させメモリの空き領域を増やすなどして、できるだけ長い時間の粒子データを保存させる工夫が必要である。

相関関数の計算手順としては、まず、ある時間帯の磁場の平行方向に近いアンテナの波形データを抜き出し振幅を求める。波形データに対しヒルベルト変換を行い、90 度位相がずれた信号を生成する。必要なカウント値としては、エネルギーレンジ毎に粒子カウント値と電界波形値との積を積分したもの、90 度位相がずれた電界波形値との積を積分したもの、総カウント数の三つである。それぞれ、SIN COUNTS、COS COUNTS、TOTAL COUNTS と呼ぶ。メモリに蓄えられている粒子データ一個ずつについて、その時の波形データの強度を粒子のエネルギー 32 分割、入射方向 16 分割のうちの該当する SIN COUNTS、COS COUNTS へ和算し、TOTAL COUNTS はインクリメントする。これを全ての粒子に繰り返す。したがってこの時点で  $32 \times 16 \times 3$  のデータ行列となる。この方向別に取得されたカウント値からテーブルに用意した係数行列を用い、一次元分布関数に対応するカウント値を求める。最終的に  $32 \times 3$  のデータ行列となる。以上のような流れを図 5.5 に示す。

これが基本の観測モードであるが、波形捕捉観測を行わないモードでも相関

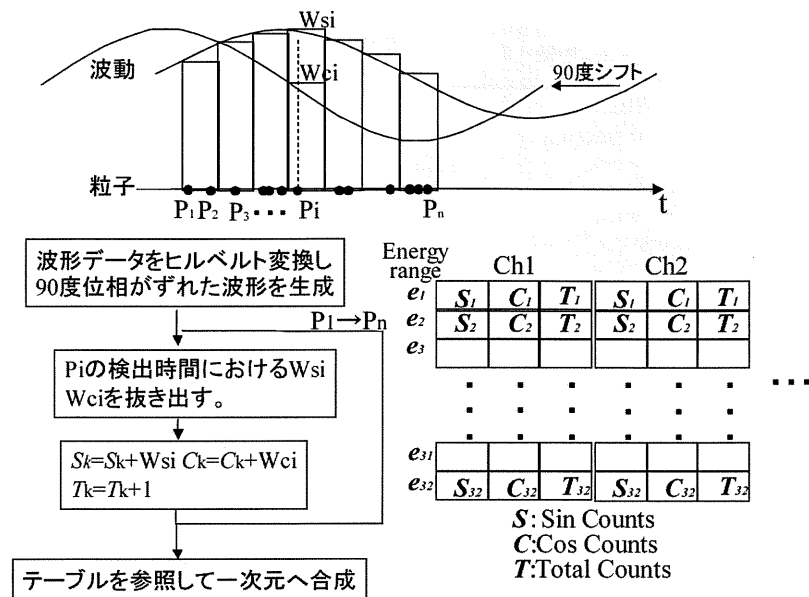


図 5.5: 相関関数計算の手順

を計算したり、ACF モードの計算を行ったり、方向別に相関を計算したりと、目的に沿った柔軟な観測が可能となる。また第3章で述べたインタフェロメトリ受信機と組み合わせ波形の伝搬方向を推定し、そのピッチアングルを持つ粒子のみを重点的に相関を計算するなど、応用観測の可能性は幅広い。

今回ターゲットとする領域での典型的なプラズマ周波数は1~2kHzである。1エネルギーステップ当りの掃引時間は1msecであり、これは波動の1周期から2周期しかない。より正確に相関をとるには数周期の積分時間が必要であり、すべてのエネルギーステップを掃引すると、時間分解能が悪くなる。したがって、粒子観測器の別のモードとして、ある特定のエネルギーレンジだけ連続して観測するモードなどがあると非常に有用である。

## 参考文献

- [1] Ergun, R. E., Carlson, C. W., McFadden, J. P., Clemmons, J. H., and Boehm, M. H., Langmuir wave growth and electron bunching: results from a wave-particle correlator, *J. Geophys. Res.*, Vol. 96, pp. 225–238, 1991a.
- [2] Ergun, R. E., Carlson, C. W., McFadden, J. P., TonThat, D. M., Clemmons, J. H., and Boehm, M. H., Observation of electron bunching during Landau growth and damping, *J. Geophys. Res.*, Vol. 96, pp. 11371–11378, 1991b.
- [3] Ergun, R. E., McFadden, J. P., and Carlson, C. W. Wave-Particle Correlator Instrument Design, Measurement Techniques in Space Plasmas: Particles, Geophysical Monograph 102, pp. 325–331, 1998.
- [4] Gough, M. P., A technique for rocket-borne detection of electron bunching at MegaHertz frequencies, *Nucl. Instrum. Methods*, Vol. 177, pp. 581–587, 1980.
- [5] Gough, M. P., Particle Correlators in Space: Performance, Limitations, Successes, and the Future, Measurement Techniques in Space Plasmas: Particles, Geophysical Monograph 102, pp. 333–338, 1998.
- [6] Hashimoto, K., Nagano, I., Yamamoto, M., Okada, T., Kimura, I., Matsumoto, H. and Oki, H., EXOS-D(AKEBONO) Very Low Frequency Plasma Wave Instruments(VLF), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 35(2), pp. 278–286, 1997.
- [7] Iwai, H., Development of a software wave receiver onboard spacecraft, Master Thesis, Department of Communications and Computer Engineering Graduate School of Informatics, Kyoto University, 2001.
- [8] Kimura, I., Hashimoto, K., Nagano, I., Okada, T., Yamamoto, M., Yoshino, T., Matsumoto, H., Ejiri, M. and Hayashi, K., VLF Observations by the Akebono(EXOS-D) Satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 42, pp. 459–478, 1990.
- [9] Kojima, H., Matsumoto, H., Chikuba, S., Horiyama, S., Ashour-Sbdalla, M., and Anderson, R. R. GEOTAIL Waveform observation of Broad-band/Narrowband Electrostatic Noise in the Distant Tail, *J. Geophys.*

- Res.*, Vol. 102, pp. 14439–14455, 1997.
- [10] Kojima, H., Study on the Plasma Waves in the Geomagnetic Tail Region via Spacecraft Observations, Ph.D. thesis, Faculty of Engineering, Kyoto University, 1998.
  - [11] 黒田 普嗣, 地球磁気圏カスプ領域ロケット実験に関する基礎研究, 京都大学工学部, 学士論文, 1999.
  - [12] Kabeuchi, M., High efficiency waveform transmission for plasma wave software receiver onboard a spacecraft (in Japanese), Master Thesis, Department of Communications and Computer Engineering Graduate School of Informatics, Kyoto University, 2000.
  - [13] Matsumoto, H., Nagano, I., Anderson, R. R., Kojima, H., Hashimoto, K., Tsutsui, M., Okada, T., Kimura, I., Omura, Y. and Okada, M., Plasma Wave Observations with GEOTAIL Spacecraft, *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 46, pp. 59–95, 1994a.
  - [14] Matsumoto, H., Kojima, H., Miyatake, T., Omura, Y., Okada, M., Nagano, I. and Tsutui, M., Electrostatic Solitary Waves(ESW) in the Magnetotail : BEN Waveforms observed by GEOTAIL, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, pp. 2915–2918, 1994b.
  - [15] Matsumoto, H., Okada, T., Hashimoto, K., Nagano, I., Yagitani, S., Tsutsui, M., Kasaba, Y., Turuda, K., Hayakawa, H., Matsuoka, A., Watanabe, S., Ueda, H., Kimura, I., Kasahara, Y., Omura, Y., Matsumura, T., Imachi, T., Ishisaka, K. and Tatenno, Y., Low Frequency plasma wave Analyzer(LFA) onboard the PLANET-B spacecraft, *Earth Planets Space*, Vol. 50, pp. 223–228, 1998.
  - [16] Muschietti, L., Roth, I., and Eugun, R. E, Interaction of Langmuir packets with streaming electrons, *Phys. Plasmas*, Vol. 1, pp. 1008–1024, 1994.
  - [17] Omura, Y., Kojima, H., and Matsumoto, H. Computer simulation of Electrostatic Solitary Waves : A nonlinear model of broadband electrostatic noise, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, pp. 2923–2926, 1994.
  - [18] Omura, Y., Matsumoto, H., Miyake, T., and Kojima, H. Electron beam instabilities as generation mechanism of electrostatic solitary waves in the magnetotail, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, pp. 2685–2697, 1996.



- [19] Omura, Y., and Matsumoto, H., KEMPO1: Technical guide to one-dimensional electromagnetic particle code, in *Computer SPace Plasma Physics*, edited by H. Matsumoto and Y. Omura, p. 21 Terra Scientific, Tokyo, 1993.
- [20] 上田 義勝, 小嶋 浩嗣, 岩井 宏徳, 藤原 亮介, 橋本 弘蔵, 松本 紘, 長野 勇, 岡田敏美, 北極ロケット実験搭載用デジタル制御型プラズマ波動受信機の開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-B, 2001.
- [21] Watkns, N. W., Bather, J. A., Chapman, S. C., Gough, M. P., Wygant, J. R., Hardy, D. A., Collin, H. L., Johnstone, A. D. and Anderson, R. R., Suspected Wave Particle Interactions Coincident with a Pancake Distribution as Seen by CRRES Spacecraft, *Adv. Space. Res.*, Vol. 10, 83-87, 1996.
- [22] Watkins, N. W., Chapman, S. A., Gough, M. P., and Forsberg, P., In-site Spacecraft Particle Autocorrelation and Cross-Correlation: Theory and Practice, *Measurement Techniques in Space Plasmas: Particles, Geophysical Monograph 102*, pp. 319-324, 1998
- [23] Umeda, T., Computer Simulations of Electron Beam Instabilities in Open Systems: Formation of Electrostatic Solitary Waves, Master Thesis, Department of Communications and Computer Engineering Graduate School of Informatics, Kyoto University, 2001.
- [24] T.H. ステックス, プラズマの波動 (上), 田中 茂利, 長 照二 共訳, 吉岡書店, 1996.

## 附録

### A.1 相関関数を求める時の係数の求め方

今回設計した波動粒子相関計測器では、磁場を含む一つの平面内から入射する粒子データを扱う。したがって得られる分布関数は  $f(v_k, \theta_l)$  の2次元分布関数である。この分布関数を求める際には、観測されたカウント値から観測器に固有の係数をかけることにより求めることができる。この求められた2次元分布関数から、まず  $f(v_{\parallel}, v_{\perp})$  の2次元分布関数を求める。最終的に一次元分布関数を求めるには、 $v_{\perp}$  方向で積分しなければならないので、グリッドに配置し直す必要があり補間しなくてはならない。

$v_{\parallel} - v_{\perp}$  平面内の一つのグリッド点を  $v - \theta$  空間に投影した点を P とする。その様子を図 A.1 に示す。点 P における分布関数  $f$  は、図中の  $f_1 \sim f_2$  と  $v - \psi$  空間上の面積  $S_1 \sim S_2$  から次のように求める。

$$f = \frac{S_1 \times f_1 + S_2 \times f_2 + S_3 \times f_3 + S_4 \times f_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (\text{A.1})$$

で求める。

ここでエネルギーレンジを 32 分割、入射角度を  $360^\circ$  を 16 分割すると仮定する。16 分割された角度のなかで磁場に平行方向を向いているものを決め、その回りの 7 つの方向を用いて計算する (図 A.2)。したがって、 $E_1 \sim E_{32}$ 、 $\theta_1 \sim \theta_7$  でそれぞれカウント値が得られるとする (ただし  $\theta_4 = 0^\circ$ )。このとき、上記の補間を用いて  $v_{\perp}$  方向に積分して求めた一次元分布関数  $f(E_k)$  は、

$$f(E_k) = \sum_{m=1}^{32} \sum_{n=1}^7 a_{mn}^k \cdot C(E_m, \theta_l) \quad (\text{A.2})$$

となり、 $32 \times 7$  の係数行列  $A^k$  が  $k = 1 \sim 32$  まで得られる ( $C(E_k, \theta_l)$  は実際のカウント値)。

実際に波動粒子相関計測器に利用する場合、実際の速度空間密度を求めると非常に値が小さくなるため計算上支障をきたし、また総検出カウント数の目安がわからなくなり統計的な誤差が議論できない。したがって

$$\hat{A}^k = A^k / a_{k4}^k \quad (\text{A.3})$$

により規格化し磁場に平行方向から入射したカウント数を基準とする。本文中

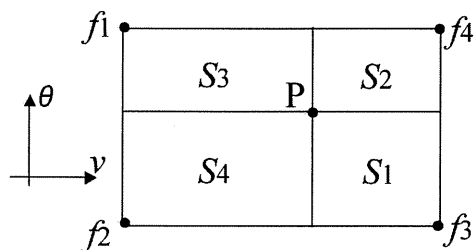


図 A.1: 補間の方法

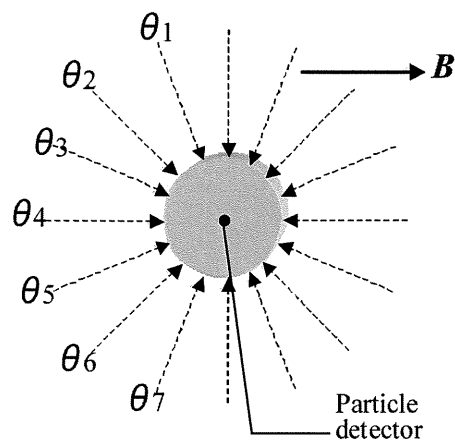


図 A.2: 粒子の入射方向

の図 5.3はこのようにして求めたカウント値である。

この行列は、磁場に平行、反平行ともに用いることができ、したがって、16分割の角度のうちの垂直方向をのぞいた14個のデータを用いて求めることができる。



## 添付研究成果資料 2

### プラズマ波動によるプラズマ温度推定の研究

(RASC 電波科学計算機実験シンポジウム報告書より抜粋)

## プラズマ波動によるプラズマ温度推定の研究

Measurement of Plasma Temperatures via plasma wave observations

研究代表者：小嶋 浩嗣（京都大学宙空電波科学研究センター）

kojima@kurasc.kyoto-u.ac.jp

### 研究目的 (Research Objective):

宇宙プラズマの温度は、従来衛星に搭載されたプラズマ粒子計測器の観測結果をもとに決定されてきた。しかし、実際のプラズマ観測機では、衛星のポテンシャルの影響や光電子の影響などが現れ、温度を実際に求めるためには、複雑なプロセスを得て、ノイズを除去してからでないといけないとか、計測エネルギーがどうしても衛星のポテンシャル以下を押さえることが難しいため、Cold なコアコンポーネントの温度成分が測定できないとか、計測データを積分するために、時間分解能が落ちる、などの問題があった。一方、ヨーロッパを中心として、プラズマ周波数付近で観測されるプラズマの熱雑音を理論式で fitting して温度を推定しようとする試みが行われてきており、その成果をあげてきている。プラズマ温度は、宇宙プラズマの物理を考えると重要な物理パラメータであり、それを正確に測定することには、大きな意義がある。日本では、このプラズマ熱雑音をもとに温度を推定する試みは、これまで行われてきておらず経験が乏しい。しかし、将来の衛星ミッション、惑星ミッションを考えたとき、プラズマ波動から精度良く、時間分解能良く、温度を推定する手法を確立しておくことは非常に重要である。本研究では、理論式を用いて、GEOTAIL のデータを Fitting し、太陽風、マグネトシース中でのプラズマ温度の推定手法を確立することを目的とする。

### 計算手法 (Computational Aspects) :

片側の長さ  $L$  であるダイポールタイプのワイヤ電界アンテナ上にプラズマの熱的ゆらぎにより誘起される熱雑音電圧  $V_T$  は、外部磁場がなく、また、縦波成分だけを考慮した場合は、次式であたえられる (Meyer-Vernet and Perche, 1989)。

$$V_T^2 = 4k_B T_C \frac{4}{\pi^2 \epsilon_0 \omega} \int_0^\infty \frac{F_1(kL) J_0^2(ka)}{|D_L|^2} \sum_{q=C,H} \left( \frac{T_q}{T_C} \text{Im}(\epsilon_q) \right) dk$$

$$D_L = 1 + 2 \sum_{q=C,H} \left( \frac{\omega_{pq}^2}{k^2 v_{tq}} \right) \left( 1 + \frac{\omega}{k v_{tq}} Z \left( \frac{\omega}{k v_{tq}} \right) \right)$$

$v_t$  : 熱速度

$\omega_p$  : プラズマ周波数

ここで、C, H は、プラズマを構成する Cold 成分と Hot 成分を意味し、特に太陽風中なのは、このような二つの成分から速度分布が成り立っている場合が多いため、こ



のような記述になっている。複素数で表されるこの式を任意のプラズマパラメータで解くことにより、アンテナ上に誘起される熱雑音電圧を求めることができる。また、逆に、観測から、 $V_T$  が求まれば、逆に上式から温度や、プラズマ密度を算出することができる。ただし、その場合未知のパラメータは、温度、温度比、密度比と複数あるため、スペクトルの形状を **Fitting** して求めることになる。

## 研究成果 (Accomplishments) :

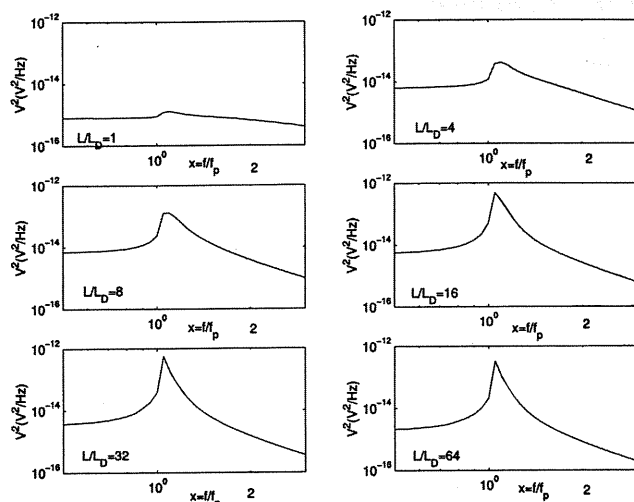


図 1: 温度一定のままアンテナ長を変化させた時の熱雑音スペクトル。

$f_{pc} = 20\text{kHz}$ ,  $T_C = 10^5\text{K}$ ,  $T_H / T_C = 7$ ,  $n_H / n_C = 0.05$  (しかし、図1でわかるように、アンテナ長がデバイ長と同程度になるとそ

の形状が平坦になり、また、電子プラズマ周波数付近でのピークも下がっていくことがわかる。これは、アンテナがデバイ長の中にはいってくると、プラズマとしての熱的な集団運動がみえなくなり、温度の影響がかき消されてしまっていると考えられる。このように、プラズマの温度を熱雑音から求めるには、デバイ長よりも十分に長い電界アンテナを用いることが必要であることがわかる。今後は、さらに、パラメータ依存性などを詳細に調べ、実際の衛星観測に役立つデータを取得する方針である。

## 公表状況 (Publications) :

### (口頭)

小嶋 浩嗣, 米澤 祐一, 新 浩一, 臼井 英之, 松本 紘, プラズマ波動観測による電子温度推定, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.

小嶋 浩嗣, 八木谷 聡, 早川 基, 笠羽 康正, 松岡 彩子, 齋藤 義文, SCOPEワーキンググループ, SCOPE計画に向けての観測機器開発II(Field系観測機), 地球電磁気地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.